

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ.

STATICAL AND DYNAMICAL ANALYSIS OF GLASS STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LENKA TROJANOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN NĚMEC, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. LENKA TROJANOVÁ

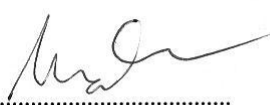
Název Statická a dynamická analýza skleněných konstrukcí.

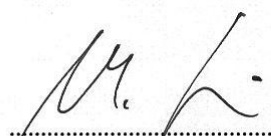
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Němec, CSc.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2013

Datum odevzdání diplomové práce 17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT



Podklady a literatura

Ivan Němec et al.: Finite Element Analysis of Structures

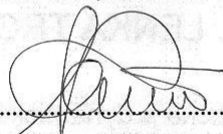
Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Práce bude probíhat v součinnosti s firmou Dlubal. Jedná se o ověření metodiky a možnosti programu RFEM pro výpočet skleněných konstrukcí.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



doc. Ing. Ivan Němec, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Díky technologickému pokroku posledních 20 let si sklo a skleněné prvky našly cestu téměř do všech oblastí lidské činnosti. Výjimkou pochopitelně není ani oblast stavitelství, ba naopak. Těžko si v současné době můžeme představit stavbu bez skleněného prvku, ať už se jedná o část interiéru či exteriéru. Přesto je teorie týkající se této problematiky v ČR na velmi nízké úrovni.

Obsahem mé diplomové práce je Statická a dynamická analýza skleněných konstrukcí, která při aplikování v praxi projeví výraznou ekonomičnost projektu.

Klíčová slova

Statika, izolační sklo, vrstvené sklo, skleněné konstrukce

Abstract

Glass and the glass elements found their way into almost all areas of human activity thanks to technological advances of the last 20 years. The area of construction is of course no exception, quite the contrary. These days it is difficult to imagine building without the glass element, whether it is a part of the interior or exterior. Yet the theory on this issue is at a very low level in the Czech Republic.

The content of my work is static and dynamic analysis of structures of glass, when it is applied in practice, it will save money.

Keywords

Statics, insulating glass, laminated glass, the glass construction

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Lenka Trojanová *Statická a dynamická analýza skleněných konstrukcí*. Brno, 2014. 107 s., 117 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Ivan Němec, CSc..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.1.2014

.....

podpis autora
Bc. Lenka Trojanová

Poděkování:

Chtěla bych touto cestou poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Ivanu Němci, CSc., za velice plnohodnotné vedené při psaní diplomové práce. V neposlední řadě největší dík patří mé rodině, přátelům a mému příteli. Děkuji všem.

OBSAH

ÚVOD

1.	POUŽITÍ SKLA VE STAVEBNICTVÍ	12
1.1	SKLO A JEHO VLASTNOSTI	12
1.1.1	Charakteristika skla	12
1.1.2	Fyzikální a mechanické vlastnosti skla	14
1.2	ZÁKLADNÍ TYPY SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ VE STAVEBNICTVÍ.....	17
1.2.1	Hlavní použití skleněných konstrukcí.....	17
1.2.2	Typy skel.....	20
2.	METODY ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH KONSTRUKCÍ.....	25
2.1	ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH ALGEBRAICKÝCH ROVNIC PRO STATICKÉ VÝPOČTY	25
2.1.1	Newton – Raphsonova iterační metoda	26
2.2.	DYNAMICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCÍ POMOCÍ NUMERICKÉ METODY PŘÍMÉ INTEGRACE	27
2.2.1.	Explicitní metody.....	28
2.2.2.	Implicitní metody	29
3.	ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U VRSTVENÝCH SKEL	33
	2D (DESKOVÁ TEORIE).....	33
	3D (MODELOVÁNÍ POMOCÍ TĚLES).....	34
3.1	PŘÍKLAD Č. 1 – SKLENĚNÝ SCHODIŠŤOVÝ STUPEŇ	35
3.1.1	Obrázek	35
3.1.2	Vstupní parametry	35
3.1.3	Výpočet konstitutivních matic při různých předpokladech spojení vrstev	37
3.1.4	Závěr příkladu č. 1.....	47
3.1.5	Kyvadlová zkouška	56
4.	ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U IZOLAČNÍCH SKEL	59
4.1	PŘÍKLAD Č. 2 – IZOLAČNÍ DVOJSKLA A TROJSKLA	60
4.1.1	Model izolačního dvojskla a trojskla	61
4.1.2	Skladba dvojskla a trojskla	61
4.1.3	Vstupní parametry dvojskla	62
4.1.4	Vstupní parametry trojskla	63
4.1.5	Výpočet/modelování skel	64
4.1.6	Dělení sítě	64
4.1.7	Parametry klimatického zatížení pro 5m	65
4.1.8	Tabulka výsledků pro dvojsklo 5m	71
4.1.9	Tabulka výsledků pro trojsklo v 5m	81
4.1.10	Parametry klimatického zatížení ve 110m	91

4.1.11	Tabulka výsledků pro dvojsklo ve 110m	94
4.1.12	Tabulka výsledků pro trojsklo ve 110m	96
4.1.13	Závěr příkladu č. 2.....	98
5.	ZÁVĚR.....	101
6.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	103
7.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	105
8.	SEZNAM PŘÍLOH.....	107

ÚVOD

Skleněné konstrukce jsou díky svým vlastnostem nenahraditelnou součástí většiny moderních staveb a nejedná se pouze o skleněné tabule oken. Moderní technologie umožnili člověku zvýšit kvalitu skla a tím rozšířit možnosti jeho použití. V současnosti již není výjimkou skleněné zábradlí, schodiště nebo dokonce celá fasáda. Stále však platí, že sklo je křehký materiál, a tak se k němu také musí přistupovat.

Nedílnou součástí každé projekční dokumentace stavby se skleněnou konstrukcí by měla být její statická analýza. Ta, při správném provedení, umožní určit typ, tloušťku i způsob uchycení skleněného prvku tak, aby byl bezpečný a zároveň co možná nejekonomičtější. Pro správné provedení této analýzy by se statik měl řídit platnou normou, která tuto problematiku řeší. V současné době však tyto normy v ČR chybí.

Ve své diplomové práci se zabývám právě touto statickou analýzou skleněných konstrukcí. Okrajově se také zaměřuji na dynamickou analýzu skleněných konstrukcí, která je využívána v případě potřeby tzv. kyvadlové zkoušky. Ta je orientována na rázové zatížení skla.

Osobně mě téma skleněných konstrukcí zaujalo při psaní bakalářské práce, kdy jsem na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí navrhovala skladbu a nosnou konstrukci pro skleněnou fasádu Autosalonu. Tento zájem, spolu s chutí a příležitostmi objevovat nové možnosti, byl hlavní motivací pro výběr mého tématu.

Celá práce je rozdělena na 2 části. První část je věnována sklu, jako stavebnímu materiálu. Pojednává o jeho chemických, mechanických a fyzikálních vlastnostech. Nastiňuje hlavní dělení a použití skleněných konstrukcí. Druhou část práce tvoří 2 charakteristické příklady statické analýzy pro vrstvené a izolační sklo.

Cílem práce je seznámení se skleněnými konstrukcemi a představení problémů vyskytujících se u jednotlivých typů skel. Ráda bych také touto prací alespoň malým dílem přispěla k vyplnění mezery, která se momentálně nachází v odborné literatuře psané českým jazykem.

TEORETICKÁ ČÁST

1. POUŽITÍ SKLA VE STAVEBNICTVÍ

1.1 SKLO A JEHO VLASTNOSTI

1.1.1 CHARAKTERISTIKA SKLA

Ve stavebnictví rozlišujeme dva hlavní druhy skel, sodnovápenatokřemičité (SVK) a borosilikátové (BS). Sodnovápenatokřemičité sklo vzniká tavením směsi sody, křemičitého písku, vápna a dalších složek. Přesné chemické složení je zobrazeno na Obr. 1. Pro stavební účely se toto sklo používá nejčastěji a je považováno za základní výrobek, z něhož se odvozují další typy skel. Odvození znamená, že určitými výrobními procesy (metodami) vznikne ze základního výrobku jiné sklo, např. sklo tepelně tvrzené, tepelně zpevněné, smaltované atd.... Tato skla se poté liší hlavně svou pevností, ale třeba i vzhledem a tudíž i místem použití. Borosilikátové sklo se vyznačuje vysokou tepelnou a chemickou odolností, proto se uplatňuje hlavně u požární ochrany skel anebo jako tepelně odolné sklo a hlavně v laboratořích.¹ [1] [2] [3]

		Sodnovápenato křemičité sklo	Borosilikátové sklo
Křemičitý písek	SiO ₂	69 - 74 %	70 - 87 %
Vápno (oxid vápenatý)	CaO	5 - 14 %	-
Soda	Na ₂ O	10 - 16 %	0 - 8 %
Oxid boritý	B ₂ O ₃	-	7 - 15 %
Oxid draselný	K ₂ O	-	0 - 8 %
Magnesium	MgO	0 - 6 %	-
Hliník	Al ₂ O ₃	0 - 3 %	0 - 8 %
Ostatní		0 - 5 %	0 - 8 %

Obr. 1 - Chemické složení sodnovápenatokřemičitého a borosilikátového skla dle EN 572-1:2004 a EN 1748-1-1:2004

Za základní výrobek je ve stavebním průmyslu považováno sklo, které je ploché, průhledné, sodnovápenatokřemičité, čiré i barvené ve hmotě (zeleně, šedě, bronzově a modře). Standardní tloušťky pro tento typ skla jsou 3 – 6, 8, 10, 12, 15, 19 a 25 mm a největší vyráběné skleněné tabule dosahují velikosti 6 x 3,21 m. [1]

¹ Výrobní procesy a podrobné popisy jednotlivých skel nejsou náplní této práce, a proto nebudou podrobně rozepsány

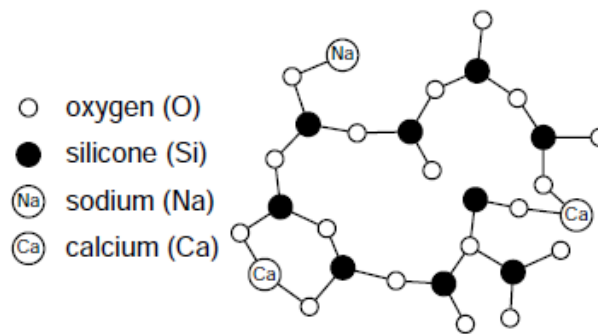
Základní charakteristiky skla lze shrnout do těchto bodů:

- Anorganický výrobek.
- Visko-elastický materiál.

SKLO je tuhé při pokojové teplotě, ale při teplotách nad přechodovou oblastí (nad cca 580°C) je tekuté.

- Amorfní látka.

SKLO nemá pravidelnou krystalickou strukturu Obr. 2. Tato nepravidelnost způsobuje, že světlo může sklem „procházet“ bez omezení, což má za následek jeho dobrou průhlednost a průsvitnost. [4]



Obr. 2 - Schematický pohled na nepravidelnou síť sodnovápenatokřemičitého skla [2]

- Izotropní látka.

SKLO má ve všech směrech stejné fyzikální vlastnosti, kde platí vztah:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (1.1)$$

E – modul pružnosti

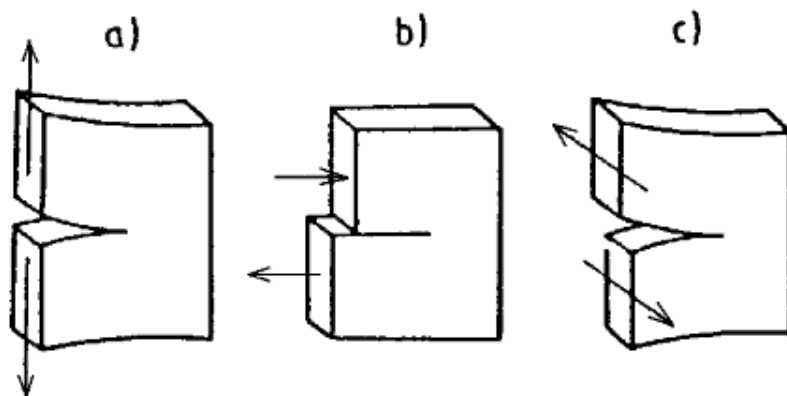
G – modul smyku

ν – Poissonova konstanta

- Křehký materiál.

SKLO vykazuje křehkost tím, že je zabráněno vzniku plastické deformace při působení smykových napětí bez možnosti lokálních kluzů a dochází k porušení bez předchozího viditelného upozornění. Po překročení mezního napětí (45 – 120 MPa závisí na typu skla) se vyskytuje nestabilní křehký lom, kde iniciátorem lomu jsou ve skle přítomné mikrotrhlínky viz Obr. 6. Křehký lom závisí na mnoha proměnných. Mimo jiné na mikrostruktuře materiálu, způsobu výroby, tvaru a rozměru zkušebních vzorků, na velikosti a druhu přiloženého napětí, na teplotě a charakteru prostředí, na rychlosti zatěžování atd..

U skel se vychází z předpokladu tzv. Griffithových trhlinek, které se objeví ve skle ještě před zatížením. Tyto trhlinky se, vlivem technologického procesu, vytváří na povrchu skla a mají velikost řádově nm. Trhlínka může být zatěžována a rozevírána tahovým a smykovým napětím dle Obr. 3. [5]



Obr. 3 - Možnosti rozevírání trhlinky; a) tahem b) smykem v rovině c) smykem tzv. antirovinným [5]

1.1.2 FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI SKLA

Souhrnné fyzikální a mechanické vlastnosti sodnovápenatokřemičitého a borosilikátového skla jsou uvedeny v Tab. 1. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [1] [2]

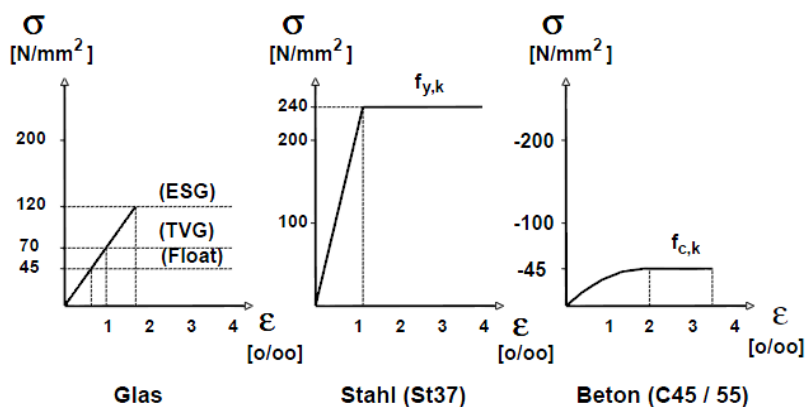
Tab. 1 - Fyzikální vlastnosti sodnovápenatokřemičitého a borosilikátového skla dle EN 572-1:2004 a EN 1748-1-1:2004

	symbol	jednotky	Sodnovápenatokřemičité	Borosilikátové sklo
Objemová hmotnost při 18°C	ρ	kg/m ³	2500	2200-2500
Youngův modul	E	MPa	70 000	60 000-70 000
Modul tuhosti	G	MPa	28 455	25 000-29 166
Poissonova konstanta	ν	-	0,23	0,2
Tvrdost podle Mohsovy stupnice	$H_{K0,1/20}$	-	6	4,5-6
Teplota tavení	T_t	°C	≈1500	
Teplota měknutí	T_m	°C	≈600	
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	α	K ⁻¹	9·10 ⁻⁶	3,1-4;4,1-5;5,1-6
Tepelná vodivost	λ	W/(m·K)	1	1
Specifická tepelná kapacita	c_p	J/(kg·K)	720	800
Index lomu ve srovnání s indexem lomu vzduchu	n	-	1,52	1,5
Součinitel prostupu tepla (jednoduché ploché sklo, tl.4 mm)		W/(m ² ·K)	5,8	-
Světelný činitel prostupu (jednoduché ploché sklo, tl.4 mm)			0,9	-
Solární faktor (jednoduché ploché sklo, tl.4 mm)			0,87	-
Normálová emisivita čirého skla nebo skla s povlakem, který má stejnou emisivitu jako podkladní sklo			0,89	-
Pevnost v tlaku	$f_{c,k}$	MPa	1000	-

Tab. 2 - Charakteristické pevnosti v tahu nejpoužívanějších skel

CHARAKTERISTICKÁ PEVNOST V TAHU			
Chlazené sklo	$f_{t,k}$	MPa	45
Tepelně zpevněné sklo	$f_{t,k}$	MPa	70
Tepelně tvrzené sklo	$f_{t,k}$	MPa	120

Na Obr. 4 jsou zobrazeny pevnosti dalších materiálů, abyste si udělali lepší představu o pevnosti skla. Z křivek jednotlivých grafů jde také vidět mez porušení, která se u skla rovná mezi pevnosti.



Glas = sklo – ESG – Tepelně tvrzené
TVG – Tepelně zpevněné
Float – Chlazené sklo
Stahl (St37) = Ocel S370
Beton (C45/55) = Beton C 45/55.

Obr. 4 - Porovnání pevnosti v ohybu skla, oceli a betonu [9]

Při posouzení mechanických vlastností skla, je potřeba znát jeho::

- Hustotu a složení.
- Modul pružnosti a Poissonovu konstantu.
- Pevnost v tahu, tlaku, ohybu a smyku.
- Rázovou houževnatost.
- Ostatní faktory (tvrdost, kvalitou povrchu skla, únavou a stárnutí, rozměr a tvar výrobků). [5]

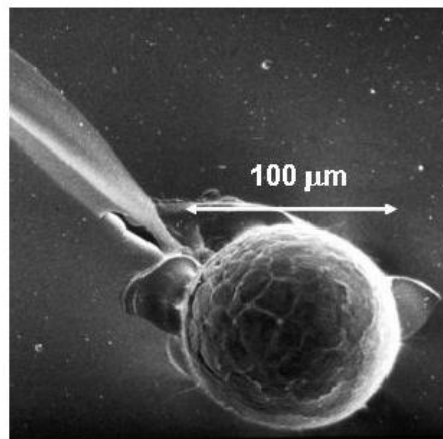
Obecně má sklo velkou pevnost v tlaku, ale malou pevnost v tahu. Teoretické tahové napětí skla je mimořádně vysoké a může dosáhnout 6 000-10 000 MPa. Tyto hodnoty však nelze brát za relevantní pro praktické konstrukční účely. Skutečná pevnost v tahu, je 40-100 MPa. To je způsobeno vysokým množstvím mechanických vad (nedostatků). Tyto vady mohou být viditelné pouhým okem, ve formě škrábů Obr. 5, nebo skryté. Skryté vady jsou způsobeny sulfidem niklu Obr. 6, který má mikroskopické rozměry a vzniká ve skle během výroby. Tato vada může způsobit tzv. „samoexplozi skla“. Aby to nenastalo v době, kdy je sklo zabudováno do konstrukce a neporušilo se v době užívání, dělá se tzv. „Heat soak test“, který případné vady odhalí. [2]

Jakmile intenzita napětí v důsledku tahového napětí na špičce jedné vady dosáhne kritické hodnoty, skleněný prvek se poruší a vyskytne se křehký lom. Trhlina roste s časem zatěžování a rychlost porušení je závislá na několika parametrech, přičemž je extrémně variabilní. Zjednodušeně se dá říci, že pevnost v tahu skla není materiálová konstanta, ale záleží na mnoha aspektech, jako je [2]:

- Stav hran a povrchu.
- Velikost skleněného prvku.
- Historie zatížení (intenzita a trvání).
- Reziduální napětí.
- Podmínky prostředí.

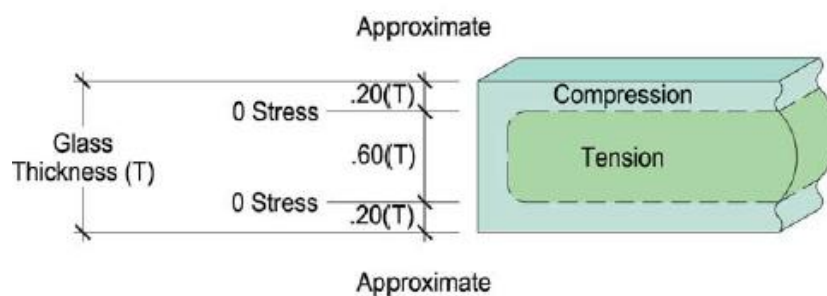


Obr. 5 - Škráb na skle [20]

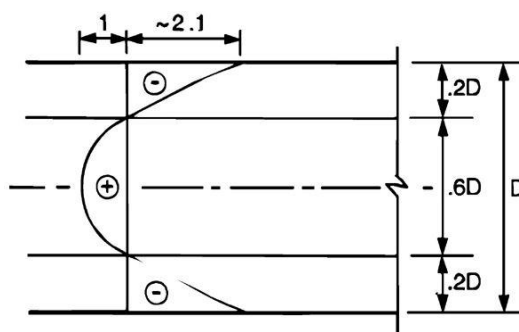


Obr. 6 - Mikroskopické zobrazení sulfidu

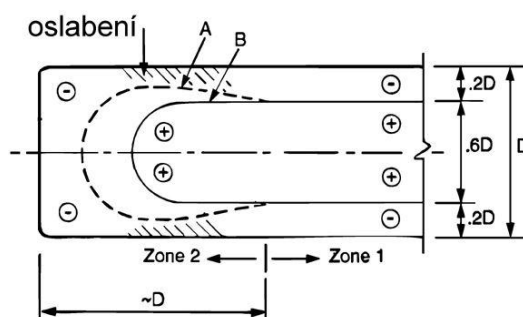
Povrchová trhlina se nezvětšuje nebo se neporuší, pokud se nachází v tlačené části. Tento případ se však u chlazeného jednovrstevného skla moc často nenastává. Proto byla vytvořena metoda, kdy se díky rychlému ochlazení rozžhavené hmoty skla na povrchu vytvoří tlakové napětí a tahové zůstává uprostřed hmoty skla. Tím se zvýší pevnost skla až trojnásobně. Sklo, které projde touto úpravou, se nazývá Tepelně tvrzené sklo. Poměry rozdělení napětí po průřezu jsou vidět na Obr. 7. Na Obr. 8 a na Obr. 9 vidíme průběhy napětí ve středu a na hraně tepelně tvrzeného skla. Tepelně tvrzené sklo se používá tam, kde je potřeba zvýšit ochranu osob před poraněním, nebo zvýšit pevnost skla. [2]



Obr. 7 - Tahové a tlakové rozdělení napětí po průřezu u tepelně tvrzeného skla. [8]



Obr. 8 - Průběh napětí u hrany skla
(- tlak, + tah, D – tloušťka tabule skla) [4]



Obr. 9 - Průběh napětí ve středu tabule skla (- tlak, +
tah, D - tloušťka tabule skla) [4]

Závěr

Sklo má malou únosnost v tahu, a proto se posudky zaměřují na mezní hodnoty napětí v tahu. Po překročení této hodnoty nastává ve skle lom a sklo praská. Pokud chceme zvýšit únosnost skla, použijte se Tepelně tvrzené sklo, které má největší pevnost v tahu mezi skly (120 MPa). Sklo, jako křehký materiál, je velice „zranitelný“ a tudíž je nutné striktně dodržet technologické postupy a dbát na šetrné zacházení od výroby přes uskladnění až po montáž. Všechny tyto dílčí části mohou výrazně ovlivnit pevnost a životnost skla a hlavně bezpečnost lidí.

1.2 ZÁKLADNÍ TYPY SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ VE STAVEBNICTVÍ

1.2.1 HLAVNÍ POUŽITÍ SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Skleněné konstrukce se používají především pro jejich transparentnost. Působí lehce, moderně, vznešeně, ale při tom stále přirozeně. Mají velké využití jak v interiéru, tak i v exteriéru. Sklo je úžasný materiál, jenž vytváří pro člověka a jeho okolí příjemné prostředí. Nejčastěji se skleněné konstrukce používají jako:

- Výplně otvorů.



Obr. 10 - Skleněná okna a střecha [6]

- Zábradlí.

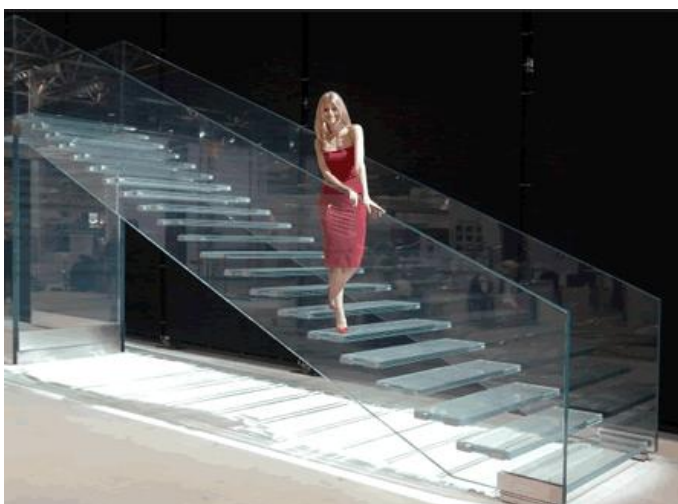


Obr. 11 – Zábradlí v interiéru [7]



Obr. 12 - Zábradlí v exteriéru [8]

- Schodiště.



Obr. 13 - Celoskleněné schodiště [9]

- Obvodové pláště.



Obr. 14 - Obvodový plášť [10]

- Výtahové šachty.



Obr. 15 - Výtahová šachta [11]

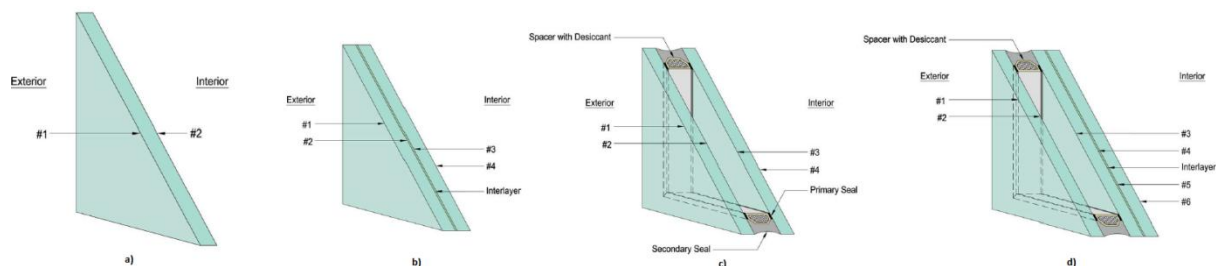
- Skleněné příčky.



Obr. 16 - Skleněné příčky [12]

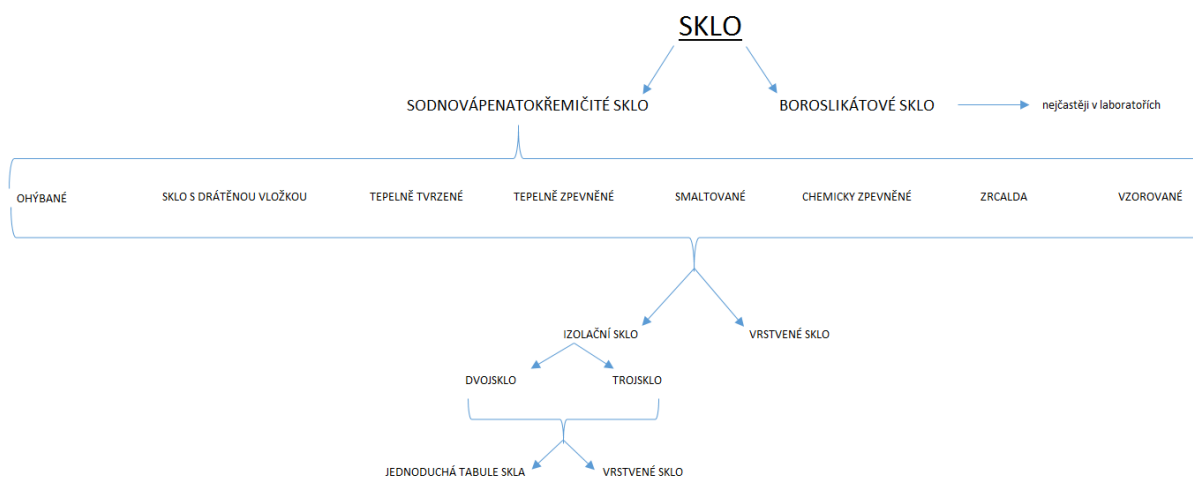
1.2.2 TYPY SKEL

Hlavní dělení skel je na Obr. 17. Izolační skla mohou obsahovat jak skla jednovrstvá, tak vrstvená. V dalších podkapitolách bude nastíněna základní problematika a informace o sklech vrstvených a izolačních



Obr. 17 - a) jednovrstvé sklo, b) vrstvené sklo, c) izolační dvojsklo, d) kombinace a) b) a c) [13]

Obr. 18 ukazuje přehlednou strukturu dělení všech skel.



Obr. 18 - Přehled skel

1.2.2.1 Izolační sklo (insulating glass unit (IGU))

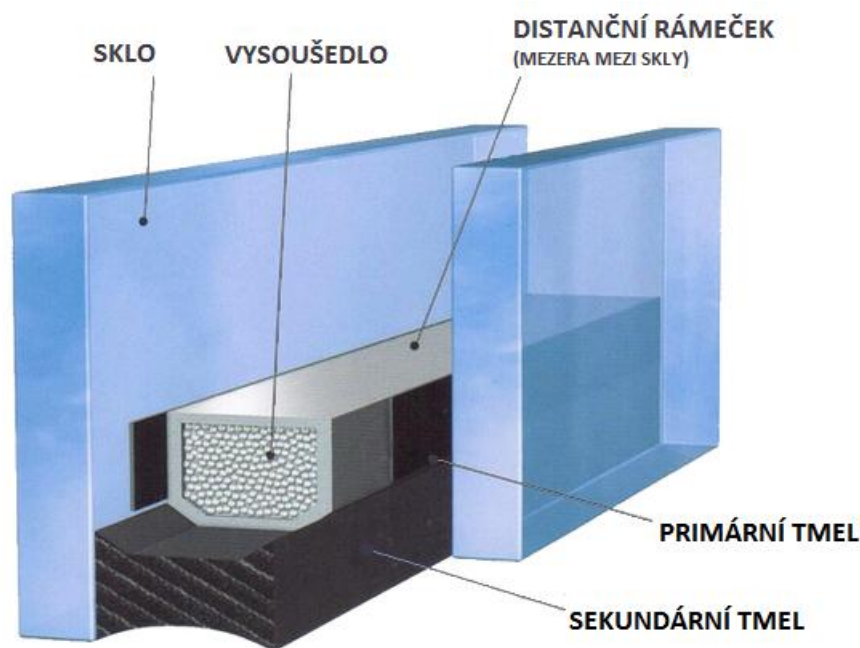
- Norma

Řídí se normou ČSN EN 1279 Sklo ve stavebnictví – Izolační skla – Část: 1 – 6

Definice izolačního skla, které uvádí norma výše: „Výrobek sestávající nejméně ze dvou tabulí skla, oddělených jedním nebo více distančními rámy, hermeticky utěsněný podél obvodu, mechanicky stálý a trvanlivý“²

- Popis

Izolační sklo může být tzv. dvojsklo nebo trojsklo. Odvíjí se to od počtu tabulí skla a distančních rámečků. U dvojskla jsou to dvě tabule skla a mezi nimi jeden distanční rámeček, trojsklo tvoří tři tabule skla a dva distanční rámečky. Konstrukce dvojskla je znázorněna na Obr. 19.



Obr. 19 – Dvojsklo

Distanční rámeček

Vytváří mezeru mezi skly, nejčastěji se používá 12-16 mm. Na kvalitu má z tepelně-technického hlediska vliv konstrukce a tepelná vodivost materiálů, ze kterých byl distanční rámeček vyroben. Proto máme distanční rámečky: z termoplastu, z nerezové oceli a z hliníku. [6]

Dutina mezi skly

je vyplněna suchým vzduchem nebo vzácným plynem. Díky nízké tepelné vodivosti vzduchu (při $T = 10^{\circ}\text{C}$ je $\lambda = 0.025 \text{ W/(m}\cdot\text{t)}$) nebo vzácných plynů (argon $\lambda = 0.017 \text{ W/(m}\cdot\text{t)}$, krypton $\lambda = 0.009 \text{ W/(m}\cdot\text{t)}$) je snížen součinitel tepla zasklení U_g a tím jsou zvýšeny tepelně izolační vlastnosti. Díky tomu je splněn hlavní požadavek na izolační skla, což je vyšší tepelná izolace v porovnání s jednoduchým zasklením. [1]

Primární a sekundární tmel

vnější okraj izolačního skla musí být po celém obvodu utěsněn trvale pružným tmelem, který zabraňuje pronikání vlhkosti do dutiny. Používá se primární tmel, butyl, na bázi polyisobutylenu a u izolačních skel také tmel sekundární, polyuretanový dvousložkový tmel [6]

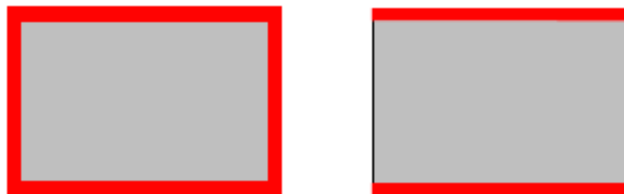
² ČSN EN 1279 Sklo ve stavebnictví – Izolační skla – Část: 1 – 6

Vysoušedlo

Vysoušecí prostředek (vysoušedlo) – vyplňuje distanční profil a má absorpční vlastnosti (ochrana před kondenzací). Díky tomu pohlcuje vlhkost a vyrovnává tlak v dutině mezi skly. [7]

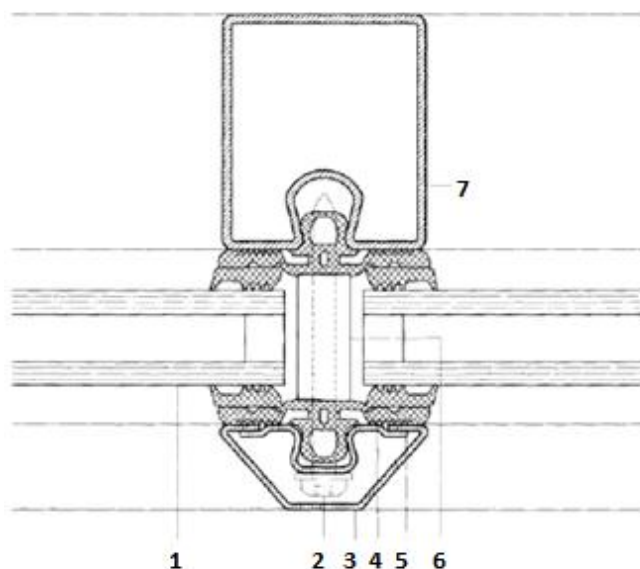
- Uchycení

Izolační skla se nejčastěji uchycují po obvodě, ale je možné je také uchytit po 2 stranách viz Obr. 20.



Obr. 20 - Uchycení skla - vlevo po obvodě, vpravo po 2 stranách [16]

Na Obr. 21 je zobrazeno upevnění skla k nosné konstrukci, kterou může být ocel, beton i dřevo.



1. Izolační sklo
2. Šroub
3. Krycí lišta
4. EPDM-Profil
5. Přítlačná lišta
6. Distanční otvor
7. Profil konstrukce

Detail uchycení izolačního skla ke konstrukci [16]

- Výpočet

Statický výpočet izolačních skel probíhá metodou konečných prvků. Skleněné tabule jsou modelovány tělesovými, nebo skořepinovými prvky. Vzduchové komory jsou modelovány objemovými vzduchovými prvky, které nemají materiálovou tuhost, ale řídí se stavovou rovnicí plynů. Při výpočtu se pak vychází ze stavové rovnice pro ideální plyn:

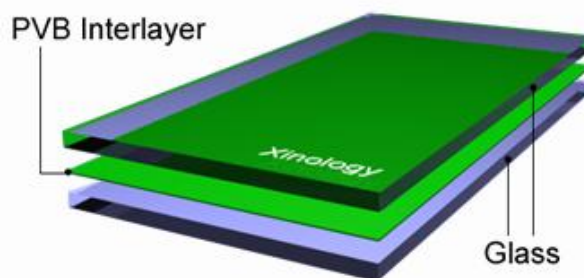
$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = k. \quad (1.2)$$

Výpočet izolačních skel probíhá vždy teorií III. řádu, tj. teorií velkých deformací. Většinou je použita Newton-Raphsonova metoda³⁴ [8]

³ Princip výpočtu Newton-Raphsonovy metody je popsán v kapitole 2.1.1

⁴ Podrobnější informace jsou v kapitole 4 ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U IZOLAČNÍCH SKEL

1.2.2.2 Vrstvená skla (Laminated Glass – LG)



Obr. 22 - Vrstvené sklo - 2 tabule skla s polyvinylbutyrovou (PVB) folií [18]

- Norma

Řídí se normou ČSN EN ISO 12543-1-6 Sklo ve stavebnictví – Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo – Část 1-6

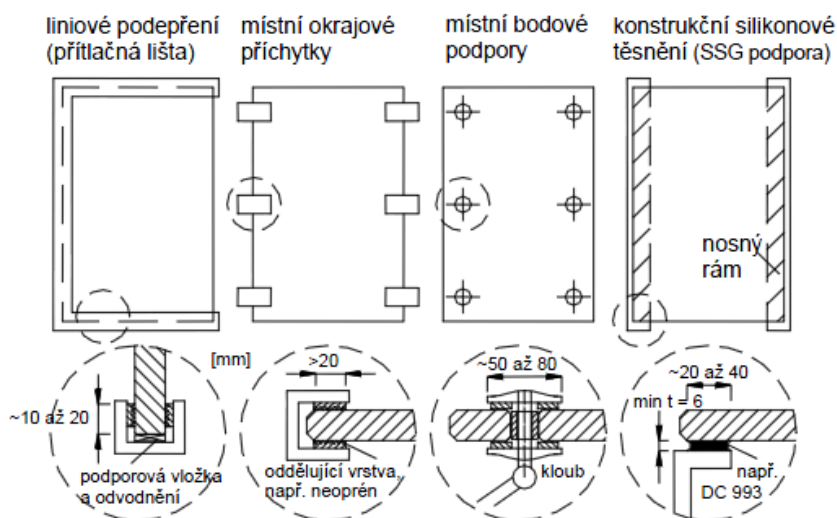
Znění normy: „Celek tvořený jednou tabulí skla a jednou nebo více tabulemi skla a/nebo plochými plastovými zasklívacími materiály vzájemně spojenými jednou nebo více mezivrstvami“⁵

- Popis

Jak již z názvu vyplývá, vrstvené znamená, že se na sebe „navrství“ několik materiálů. V tomto případě se jedná o sklo a o spojovací materiál. Spojovací materiál je pružný materiál s nízkým modulem pružnosti, okolo 3 MPa. Používá se plastová fólie (polyvinylbutyral (PVB) nebo etylenvinylacetátu (EVA nebo EVASAFE)), pryskyřice nebo gely. Tyto materiály mají za úkol po rozbití skleněné tabule udržet střepy pohromadě, aby se nesesypaly a tak se ochránily osoby před úrazem. Nejčastěji se používají právě fólie, kterými se budu v práci dále zabývat.

- Uchycení

Izolační skla se nejčastěji uchycují 1) po obvodě popř. na 3, 2, dokonce 1 straně, do lišty, kde mezi sklo a lištu se musí umístit podložka (s nízkým modulem pružnosti); 2) lokálně do úchytů, kde systém uchycení je stejný jako v bodě 1); 3) bodové uchycení, kdy se sklo provrtá skrz a je připevněno pomocí speciálních úchytů ke konstrukci; 4) sklo je přilepeno, speciálním lepidlem, ke konstrukci. Obr. 23 ukazuje jednotlivé systémy zleva doprava 1) – 4).



Obr. 23 – Nahoře: Uchycení vrstveného skla; Dole: řez konstrukcí a skla [4]

⁵ ČSN EN ISO 12543-1-6 Sklo ve stavebnictví – Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo – Část 1-6

- Výpočet

Vrstevná skla můžeme počítat, oproti izolačním sklům, i ve 2D. Z důvodu přítomnosti fólie ještě musíme rozhodnout, zda budeme uvažovat smykové spřažení vrstev či nikoliv. Toto rozhodnutí má zásadní vliv na správnost výsledků.

Samotný výpočet je proveden metodou konečných prvků, neboli zkráceně MKP. Tzv. daná oblast je diskretizována sítí na jednotlivé, konečné prvky, které se dále dělí na jednotlivé vrstvy.

Výpočet je nutně rozdělen do tří základních kroků. 1: "předzpracování" (anglicky označované preprocessing), v něm se spočítá celková materiálová matice tuhosti pro každý konečný prvek. 2: Nalezne se samotné řešení soustavy lineárních algebraických rovnic, kde výsledkem jsou deformace a vnitřní síly. 3: Proveďte se takzvané: "následné zpracování" (anglicky označované postprocessing), ve kterém je možné dopočítat napětí v jednotlivých vrstvách na základě vnitřních sil a tuhostí jednotlivých vrstev.⁶ [9]

⁶ Vše je podrobněji popsáno v kapitole 3 ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U VRSTVENÝCH SKEL

2. METODY ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH KONSTRUKCÍ

2.1 ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH ALGEBRAICKÝCH ROVNIC PRO STATICKÉ VÝPOČTY

Formulace metody konečných prvků (dále MKP) řešení nelineárních diferenciálních rovnic vede na nelineární algebraické rovnice, které můžeme napsat v následující formě [10]

$$\mathbf{K}(\mathbf{d}) \cdot \mathbf{d} = \mathbf{f}, \quad (2.1)$$

kde \mathbf{K} je matice tuhosti konstrukce

\mathbf{d} je vektor neznámých, obvykle uzlových parametrů deformace

\mathbf{f} je vektor pravých stran, obvykle uzlových sil.

Matice \mathbf{K} je funkcí a nemůže tedy být vyhodnocena bez znalosti vektoru kořenů soustavy \mathbf{d} . Protože nemůžeme tuto nelineární soustavu řešit přímo, užíváme iteračních procedur, které jsou založeny na postupném zpřesňování řešení. Každý iterační krok je lineární úlohou. [10]

Je-li řešení i – tého kroku $\mathbf{d}^{(i)}$, potom můžeme rovnici (2.1) přepsat do tvaru

$$\mathbf{K}(\mathbf{d}^{(i)}) \cdot \mathbf{d}^{(i+1)} = \mathbf{f}, \quad (2.2)$$

tedy

$$\mathbf{d}^{(i+1)} = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{d}^{(i)}) \cdot \mathbf{f}. \quad (2.3)$$

Procedura může být opakována, dokud není dosaženo potřebné přesnosti, která je založena na rozdílu vektorů $\mathbf{d}^{(i)}$ a $\mathbf{d}^{(i+1)}$. [10]

Jednotlivé metody ukažme na jedné nelineární rovnici.

Uvažujme nelineární rovnici

$$K(d)d = f, \quad (2.4)$$

nebo

$$r(d) = 0, \quad (2.5)$$

kde d je neznámé řešení. $K(d)$ je známá funkce d , je známá pravá strana (obvykle síla) a r je residuum (nevyvážené zatížení). [10]

$$r(d) = K(d)d - f, \quad (2.6)$$

Čára daná rovnicí $r(d, f) = 0$ je rovnovážná cesta nazývaná též pracovní diagram. Pro jakoukoliv

hodnotu $d^{(i)}$ je $K(d^{(i)})$ sečna křivky v $d = d^{(i)}$ a $K_T = \left(\frac{\partial r}{\partial d} \right) \Big|_{d^{(i)}}$ je tečna ke křivce v bodě $d = d^{(i)}$.

2.1.1 NEWTON – RAPHSONOVA ITERAČNÍ METODA

Hledáme řešení, při kterém jsou nevyvážené síly $r(d)$ nulové.

Provedme rozvoj $r(d)$ kolem známého řešení $d^{(i-1)}$ do Taylorovy řady.

$$r(d) = r(d^{(i-1)}) + \left(\frac{\partial r}{\partial d} \right) \bigg|_{d^{(i-1)}} \delta d^{(i)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 r}{\partial d^2} \right) \bigg|_{d^{(i-1)}} (\delta d^{(i)})^2 + \dots = 0, \quad (2.7)$$

$\delta d^{(i)}$ je přírůstek

$$\delta d^{(i)} = d^{(i)} - d^{(i-1)}. \quad (2.8)$$

Zanedbáme-li členy druhého a vyšších řádů, můžeme rovnici (2.7) přepsat následovně:

$$r(d^{(i-1)}) + \left(\frac{\partial r}{\partial d} \right) \bigg|_{d^{(i-1)}} \delta d^{(i)} = 0. \quad (2.9)$$

Pro přírůstek parametru deformace můžeme potom zapsat následující vztah

$$\begin{aligned} \delta d^{(i)} &= - \left(K_T(d^{(i-1)}) \right)^{-1} r(d^{(i-1)}) = \\ &= \left(K_T(d^{(i-1)}) \right)^{-1} (f - K(d^{(i-1)}) d^{(i-1)}), \end{aligned} \quad (2.10)$$

kde

$$K_T = \left(\frac{\partial r}{\partial d} \right) \bigg|_{d^{(i-1)}}, \quad (2.11)$$

je sklon (tangenta) čáry $r(d)$ v $d^{(i-1)}$, K je sklon sečny, procházející body $r(0)=0$ a $r(d)$. V mechanice při řešení úloh deformační variantou MKP nazýváme K_T tečnou tuhostí K sečnou tuhostí. Výraz $K(d^{(i-1)}) d^{(i-1)}$ představuje přenesené zatížení v kroku $(i-1)$. Reziduum neboli nevyvážená síla $r(d)$ postupně klesá k nule, pokud procedura konverguje.

V každé iteraci je vypočítán přírůstek neznámé veličiny d . Dosažené řešení v i -té iteraci je získáno postupnou sumací přírůstků $\delta d^{(i)}$

$$d^{(i)} = d^{(i-1)} + \delta d^{(i)}. \quad (2.12)$$

Pro soustavu nelineárních rovnic můžeme zapsat Newton-Raphsonovu proceduru takto:

$$\delta \mathbf{d} = -\mathbf{K}_T^{-1} \mathbf{r}, \quad (2.13)$$

kde \mathbf{K}_T je tečná matice

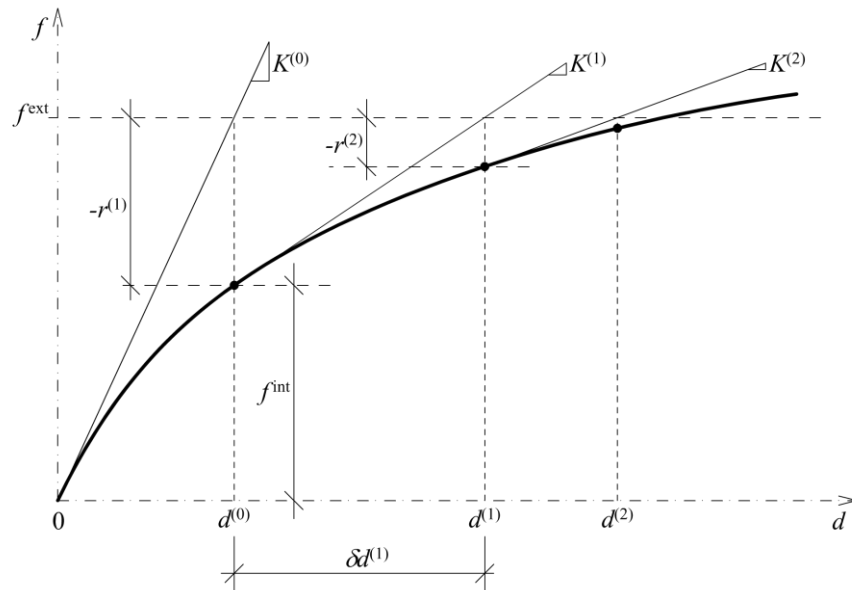
$$\mathbf{K}_T^{(i)} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{d}} \bigg|_{\mathbf{d}^{(i-1)}}, \quad (2.14)$$

\mathbf{r} je vektor nevyváženého zatížení

$$\mathbf{r} = \mathbf{f}^{\text{int}} - \mathbf{f}^{\text{ext}}, \quad (2.15)$$

\mathbf{f}^{ext} je zatěžovací vektor a \mathbf{f}^{int} je vektor uzlových vnitřních sil (vypočítaný jako energetický ekvivalent vnitřních sil).

Princip Newton-Raphsonovy metody je graficky znázorněn na Obr. 24.



Obr. 24 - Princip Newton-Raphsonovy metody

2.2. DYNAMICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCÍ POMOCÍ NUMERICKÉ METODY PŘÍMÉ INTEGRACE

Numerické metody přímé integrace řeší soustavu (2.16) v konečném počtu časových okamžiků t_0, t_1, \dots, t_m . Vzdálenost jednotlivých okamžiků $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ se nazývá délka integračního kroku. Velikosti integračních kroků Δt_i ovlivňují přesnost, stabilitu i rychlost řešení. Nedílnou součástí soustavy (2.16) jsou zadané počáteční podmínky. Za počátek považujeme čas $t = 0$, ve kterém platí $\mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}_0$, $\dot{\mathbf{u}}(t_0) = \dot{\mathbf{u}}_0$. [10]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t). \quad (2.16)$$

Soustavu (2.16) můžeme tedy napsat ve tvaru

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{K}\mathbf{u}_i = \mathbf{F}_i. \quad (2.17)$$

Numerické metody rozlišujeme zpravidla na metody:

- Explicitní,
- implicitní,
- prediktor-korektor.

První dvě metody považujeme za základní, metoda prediktor-kolektor je v podstatě simulací implicitní metody. Integrační metoda je explicitní nebo implicitní podle toho, ve kterém časovém okamžiku využívá soustavu (2.16). [10]

2.2.1. EXPLICITNÍ METODY

V explicitních metodách na základě předpokladu o průběhu pohybových charakteristik $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}$ v intervalu $\langle t_i, t_{i+1} \rangle$ a jejich znalostí v okamžiku t_i , vypočteme ze soustavy (2.16) vektory $\mathbf{u}_{i+1}, \dot{\mathbf{u}}_{i+1}, \ddot{\mathbf{u}}_{i+1}$. V explicitních metodách se neprovádí inverze matice tuhosti. [10]

Metoda centrálních diferencí

K numerické integraci diferenciálních rovnic se užívá náhrady derivací nezávislé proměnné podle času. Nahrazením derivací v (2.17) vztahy

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \frac{1}{2\Delta t_i}(\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_{i-1}), \quad (2.18)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_i = \frac{1}{\Delta t_i^2}(\mathbf{u}_{i+1} - 2\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_{i-1}), \quad (2.19)$$

dostaneme rekurentní vztah pro \mathbf{u}_{i+1}

$$\left(\frac{1}{\Delta t_i^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t_i} \mathbf{C} \right) \mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{F}_i - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t_i^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{u}_i - \left(\frac{1}{\Delta t_i^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t_i} \mathbf{C} \right) \mathbf{u}_{i-1}. \quad (2.20)$$

Nejefektivnějšího výpočtu dosáhneme v případě, že matice na levé straně je diagonální. Toho dosáhneme při uvažování diagonální matice tuhosti a při volbě $\mathbf{C} = 0$ nebo $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M}$. Metoda je však jen podmíněně stabilní. Délka integračního kroku musí splňovat podmínku [10]

$$\Delta t_i \leq \frac{T_n}{\pi}, \quad (2.21)$$

kde T_n je nejmenší perioda kmitání.

2.2.2. IMPLICITNÍ METODY

Implicitní metody vycházejí ze soustavy (2.17) v časovém okamžiku t_i . Numerická integrace soustavy se provádí krok za krokem na základě vztahu [10]

$$\ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{f}(t_i, \mathbf{F}_{i-1}, \mathbf{u}_{i-1}, \dot{\mathbf{u}}_{i-1}, \ddot{\mathbf{u}}_{i-1}), \quad (2.22)$$

přitom je třeba k započetí řešení vyčíslit zrychlení na počátku pohybu v čase t_0 přímo ze soustavy (2.17)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_0 + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_0 + \mathbf{K}\mathbf{u}_0 = \mathbf{F}_0. \quad (2.23)$$

Newmarkova metoda

Základní rovnice Newmarkovy metody, udávající vztahy mezi vektory přemístění, rychlostí a zrychlení mají tvar [10]

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i-1} + \Delta t_i \dot{\mathbf{u}}_{i-1} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t_i^2 \ddot{\mathbf{u}}_{i-1} + \beta \Delta t_i^2 \ddot{\mathbf{u}}_i, \quad (2.24)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \dot{\mathbf{u}}_{i-1} + (1 - \gamma) \Delta t_i \ddot{\mathbf{u}}_{i-1} + \gamma \Delta t_i \ddot{\mathbf{u}}_i, \quad (2.25)$$

kde β a γ jsou tzv. *Newmarkovy parametry*. Dosazením uvedených vztahů do (2.23) a úpravě dostaneme vztah pro výpočet neznámého vektoru zrychlení $\{\ddot{\mathbf{u}}\}_i$ v čase t_i

$$\begin{aligned} (\mathbf{M} + \gamma \Delta t_i \mathbf{C} + \beta \Delta t_i^2 \mathbf{K}) \ddot{\mathbf{u}}_i = & \mathbf{F}_i - \mathbf{C}[\dot{\mathbf{u}}_{i-1} + (1 - \gamma) \Delta t_i \ddot{\mathbf{u}}_{i-1}] - \\ & - \mathbf{K} \left[\mathbf{u}_{i-1} + \Delta t_i \dot{\mathbf{u}}_{i-1} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t_i^2 \ddot{\mathbf{u}}_{i-1} \right]. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Volba Newmarkových parametrů ovlivňuje přesnost a stabilitu řešení. Pro $\gamma = \frac{1}{2}$ a $\beta = \frac{1}{4}$ získáme metodu konstantního zrychlení, pro $\gamma = \frac{1}{2}$ a $\beta = \frac{1}{6}$ dostaneme metodu lineárního zrychlení. Metoda je stabilní, pokud $\beta \geq \frac{1}{4}$. Při $0 \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ je metoda podmíněčně stabilní, přičemž hlavní podmínkou je volba délky kroku Δt_i

$$\omega \Delta t_i < 2\sqrt{1 - 4\beta}. \quad (2.27)$$

Zavedme do vztahu (2.26) substituci

$$\mathbf{G} = \mathbf{M} + \gamma \Delta t_i \mathbf{C} + \beta \Delta t_i^2 \mathbf{K}, \quad (2.28)$$

$$\bar{\mathbf{F}}_i = \mathbf{F}_i - \mathbf{K}\mathbf{u}_{i-1} - (\mathbf{C} + \Delta t_i \mathbf{K}) \dot{\mathbf{u}}_{i-1} - \left((1 - \gamma) \Delta t_i \mathbf{C} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t_i^2 \mathbf{K} \right) \ddot{\mathbf{u}}_{i-1}. \quad (2.29)$$

Získáme tak vztah

$$\mathbf{G}\ddot{\mathbf{u}}_i = \bar{\mathbf{F}}_i. \quad (2.30)$$

Při řešení lineárních úloh, kde jsou matice \mathbf{K} , \mathbf{M} a \mathbf{C} konstantní, je vhodné volit také konstantní krok numerické integrace Δt_i . V tomto případě bude během celého integračního procesu konstantní také matice \mathbf{G} . Pro každý krok i tak soustavy (2.30) představují soustavy n rovnic o n neznámých, lišících se pouze pravou stranou $\bar{\mathbf{F}}_i$. Řešení takovýchto soustav je relativně rychlé, poněvadž se matice \mathbf{G} trianguluje pouze v prvním kroku. V dalších krocích se pak dopočítávají hledané vektory $\ddot{\mathbf{u}}_i$ z měnících se pouze pravých stran $\bar{\mathbf{F}}_i$. [10]

V nelineárních úlohách nejsou matice \mathbf{K} , \mathbf{M} a \mathbf{C} konstantní, a tudíž nemůžeme využít výše uvedené výhody při řešení soustavy (2.30). Obecně se matice \mathbf{G} v každém kroku mění, a tudíž je nutno v každém kroku počítat celou uvedenou soustavu. Výpočet se prodlužuje, avšak umožňuje do řešení zahrnout geometrické či materiálové nelinearity. [10]

Vztahy pro vektory přemístění, rychlostí a zrychlení lze zapsat pomocí vektorů jejich přírůstků

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i-1} + \Delta \mathbf{u}_i, \quad (2.31)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \dot{\mathbf{u}}_{i-1} + \Delta \dot{\mathbf{u}}_i, \quad (2.32)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_i = \ddot{\mathbf{u}}_{i-1} + \Delta \ddot{\mathbf{u}}_i. \quad (2.33)$$

Potom je možné dokázat, že vztah (2.30) lze upravit na následující vztah

$$\mathbf{G} \Delta \ddot{\mathbf{u}}_i = \Delta \bar{\mathbf{F}}_i, \quad (2.34)$$

kde

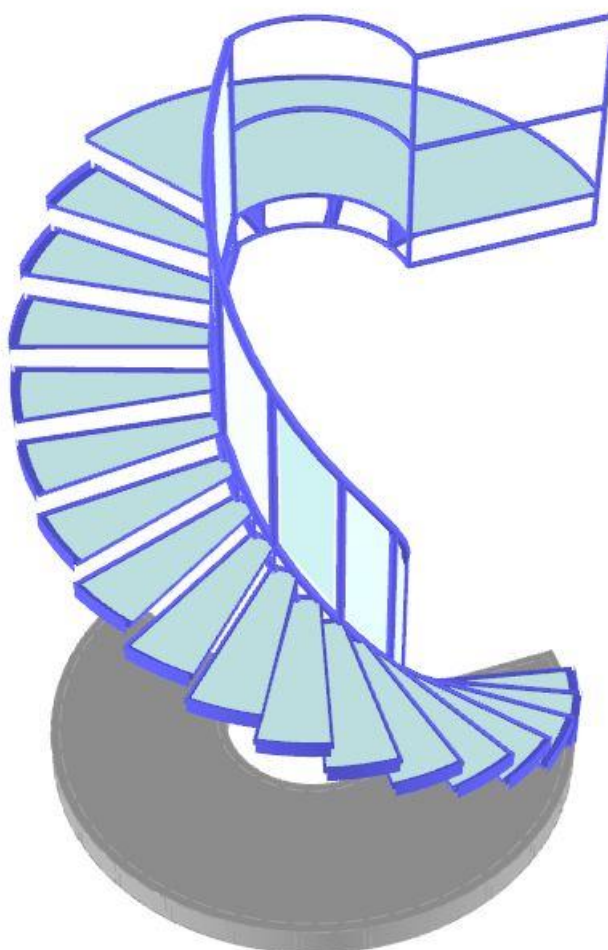
$$\Delta \bar{\mathbf{F}}_i = \Delta \mathbf{F}_i - \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}_{i-1} - (\mathbf{C} + \Delta t_i \mathbf{K}) \Delta \dot{\mathbf{u}}_{i-1} - \left((1 - \gamma) \Delta t_i \mathbf{C} + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t_i^2 \mathbf{K} \right) \Delta \ddot{\mathbf{u}}_{i-1}. \quad (2.35)$$

Aplikace

3. Vrstvené sklo

Tento typ skla bude ukázán na modelu skleněného schodiště, kde je použito vrstvené sklo jak na skleněný stupeň, tak na zábradlí. Vybrala jsem tuto konstrukci, jelikož vrstvené sklo se v praxi nejčastěji používá právě na skleněné schodiště a ochranné zábradlí. Schodiště jsem modelovala pro firmu STRAND s.r.o., která mi zadala parametry rozměrů schodiště, viz Příloha 1, a také mi dala souhlas k uveřejnění jejich materiálů v mé diplomové práci. Podrobný popis výpočet celkové deformace schodiště a návrh skladby schodů a zábradlí není předmětem této práce, samotný výpočet naleznete v Příloze 2.

3D Model schodiště z programu RFEM 5



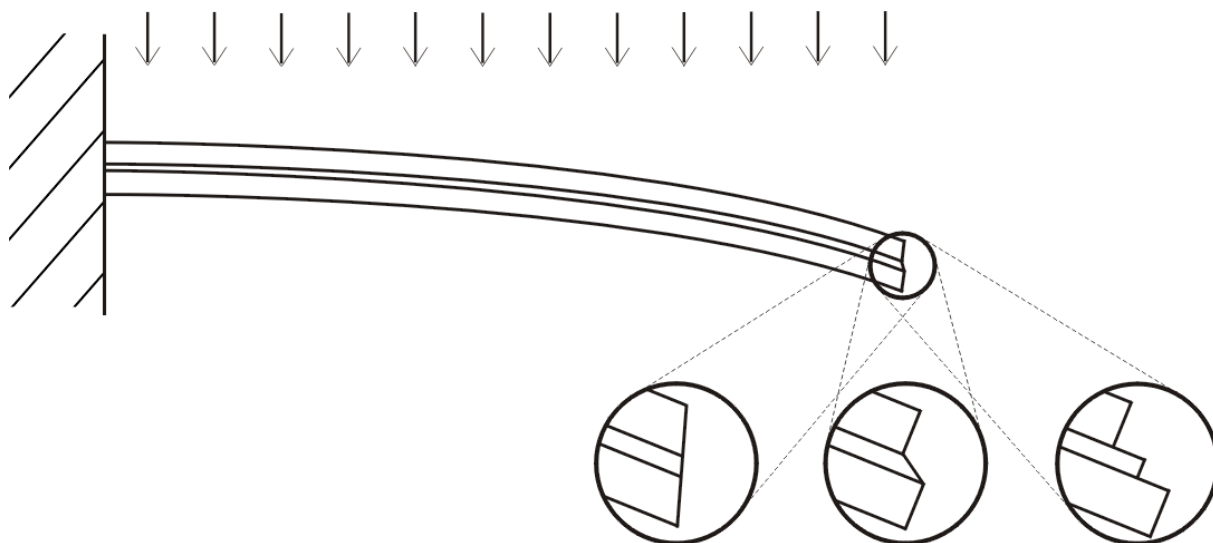
Obr. 25 - Model schodiště

3. ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U VRSTVENÝCH SKEL

Základní problém u vrstvených skel je, zda se vyplatí modelovat sklo pomocí těles, čili vytvořit 3D model, nebo postačí zjednodušený 2D model za použití deskové teorie. Jinak řečeno, problémem je najít hranici, kdy lze použít 2D model, abychom dosáhli stále správných výsledků! [8]

Máme možnost zvolit:

- 2D výpočet se smykovým spřažením vrstev
- 2D výpočet bez smykového spřažení vrstev
- 3D výpočet

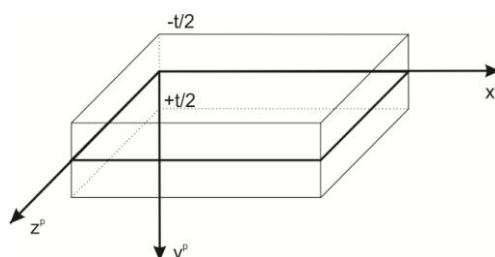


Obr. 26 - Vrstvené sklo namáhané ohybem: zleva 2D desková teorie se zohledněním smykového spřažení vrstev; 3D výpočet; 2D desková teorie bez smykového spřažení vrstev [8]

2D (DESKOVÁ TEORIE)

Pokud budeme očekávat dlouhodobě působící zatížení, musíme dovolit jednotlivým plochám vzájemný prokluz. Tento případ se nazývá „Bez smykového spřažení vrstev“. Nepočítá se zde se smykovou únosností spojovací fólie, jelikož je její tuhost se vlivem stárnutí s časem zmenšuje i o několik řádů. V opačném případě se jedná o 2D výpočet se smykovým spřažením vrstev. [8]

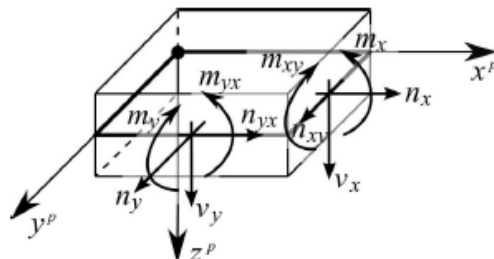
Plošné prvky je vhodné použít tam, kde charakteristická vzdálenost podpor je minimálně pětikrát větší než tloušťka. U plošných prvků vzniká problém, jaké fyzikální vlastnosti mohou mít tyto prvky, víme-li, že reálná tělesa jsou pouze 3D. Uvážíme-li dimenzi prvku, nejsme schopni u 2D prvků (deska, stěna, skořepina) geometricky definovat třetí dimenzi, tedy tloušťku prvku t . Plošný prvek je definovaný v planární rovině se souřadnicemi x_p, y_p . Prostorový zakřivený 2D-prvek, je definován na zakřivené 2D ploše v 3D prostoru Obr. 27.



Obr. 27 – Planární souřadný systém a zobrazení $\pm t/2$

Reálný fyzický prvek je 3D-těleso vyplněné spojitými hmotnými normálami k střednicové ploše prvku (x_p, y_p) tak, že na normály nanese me délky $t/2$ ve směru $+z^p$ i $-z^p$, čímž vznikne kladná lícni plocha prvku $z^p = +t/2$ a záporná $z^p = -t/2$. Mezi nimi se nachází fyzické těleso prvku. V 2D-prvku má jeho tloušťka t povahu fyzikální konstanty. V reálném fyzickém prvku vzniká prostorová napjatost a deformace. Právě v intervalu $-t/2 \leq z^p \leq +t/2$, který není geometricky v 2D-prvku obsažen, je nutné nahrazovat funkce $\sigma(z^p)$, $\varepsilon(z^p)$ vhodnými reprezentanty.

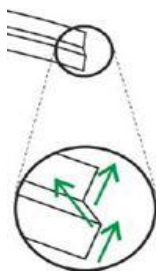
Pokud jde o funkce napětí, je ze statického hlediska nejjednodušší pracovat s jejich výslednicemi, proto definujeme u stěn, desek a skořepin tzv. vnitřní síly. Integrací napětí po tloušťce získáme skořepinové vnitřní síly Obr. 28, které jsou vztažené na jednotku šířky řezu [9]



Obr. 28 - Základní napětí a znaménková konvence u desky namáhané ohybem [9]

3D (MODELOVÁNÍ POMOCÍ TĚLES)

Reálná tělesa jsou pouze 3D, čili zvolením této varianty nikdy neuděláme krok vedle. Jediné negativum, které je spojeno s 3D výpočtem, je delší doba výpočtu. V případě vrstveného skla se vyskytuje fólie, která je oproti sklu mnohem tenčí neboli mají rozdílné tuhosti. Tzv. součin tloušťky fólie a jejího modulu pružnosti ve smyku $t \cdot G$ je tak o 3-7 řádů nižší než součin tloušťky skla s jeho modulem pružnosti ve smyku. Díky tomuto faktu dochází po deformaci ve skle a ve fólii k zalomení hmotné normály, majíc každá jiný směr viz Obr. 29 [8]



Obr. 29 – Zalomení hmotné normály [8]

3.1 PŘÍKLAD Č. 1 – SKLENĚNÝ SCHODIŠŤOVÝ STUPEŇ

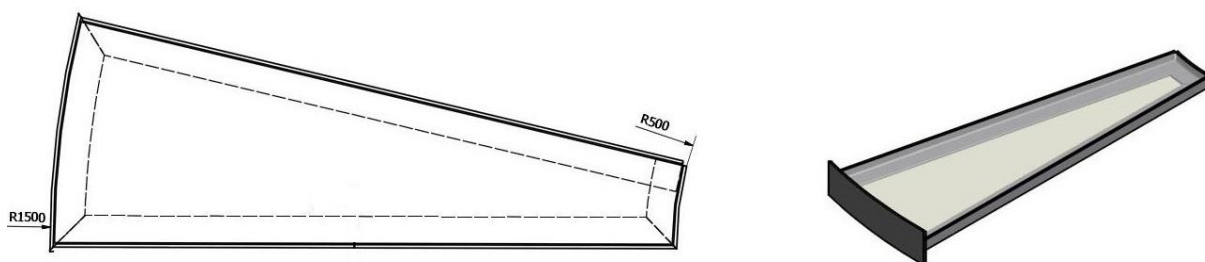
Ze zmíněného skleněného schodiště, použiji schod, ze kterého budu vycházet. Na něm budou ukázány výpočty matic tuhostí pro jednotlivé typy výpočtů, aby byl zřejmý průběh normálového napětí po tloušťce desky, a které parametry vstupují do výpočtu pro konstitutivní matici. Hlavní podstata tohoto příkladu je za 1. zjištění, při jakém poměru modulu pružnosti folie a skla selhává vzorec, u vrstvených skel, pro výpočet smykových členů u 2D výpočtu se smykovým spřažením vrstev.

$$D_{44} = D_{55} = \max \left(D_{44/55, \text{calc}} \frac{48}{5l^2} \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{t_i^3}{12}}{\sum_{i=1}^n E_i \frac{z_{\max,i}^3 - z_{\min,i}^3}{3}}} \right) \quad (3.1)$$

Vzorec byl odvozen na základě energetické ekvivalence 3D a 2D modelu. Obecně nikdy nelze provést redukci dimenze nezávadně. Vždy je totiž nutno zavést předpoklady, na základě kterých je redukce provedena. V našem případě bylo tímto předpokladem zachování přímosti hmotné normály což je předpokladem Mindlinovy deskové teorie.

Většinou problém u deskové teorie nastává u příliš tlustých desek a tam, kde minimálně jedna z vrstev má výrazně menší modul pružnosti E . V našem případě je to druhá možnost. Modul pružnosti folie je totiž o 5 řádů menší, než modul pružnosti skla. V rámci diplomové práce byla zpracována parametrická studie, jejímž cílem bylo určení maximálního poměru tuhostí skla a fólie, při kterém je výše uvedený vzorec ještě technicky dobře použitelný.

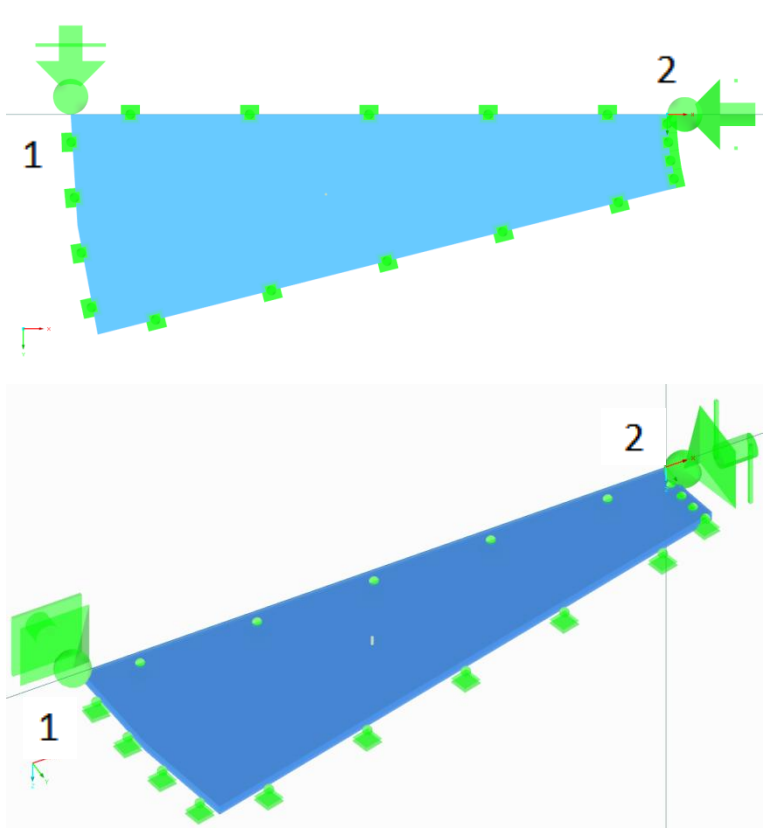
3.1.1 OBRÁZEK

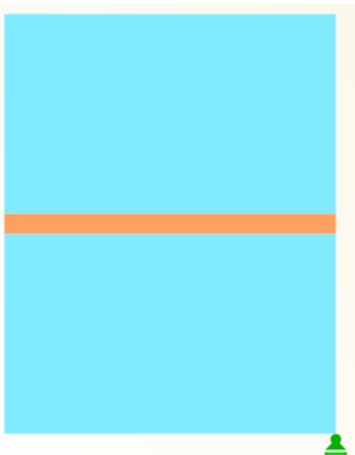


Obr. 30 – Schod

3.1.2 VSTUPNÍ PARAMETRY

1. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_1	70000	MPa
	Smykový modul	G_1	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_1	0,230	
	Tloušťka vrstvy	t_1	8,000	mm

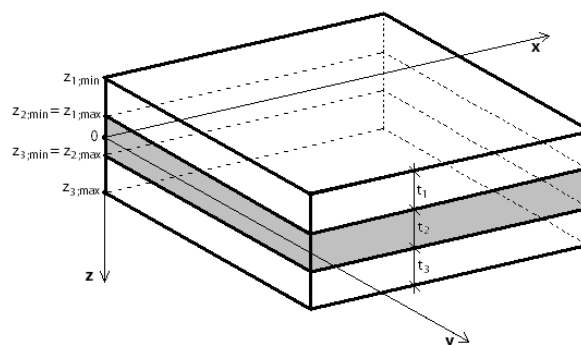
2. Vrstva - FOLIE	Typ fólie	PVB		
	Modul pružnosti	E_2	3,000	MPa
	Smykový modul	G_2	1,001	MPa
	Poissonovo číslo	ν_2	0,499	
	Tloušťka vrstvy	t_2	0,760	mm
3. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_3	70000	MPa
	Smykový modul	G_3	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_3	0,230	
	Tloušťka vrstvy	t_3	8,000	mm
Okrajové podmínky				

	Po celém obvodě: Liniová podpora na spodní hraně	 $u_z = \varphi_z = 0$
	V bodě 1: Bodová podpora na spodní hraně	$u_y = 0$
	V bodě 2: Bodová podpora na spodní hraně	$u_x = u_y = 0$
Rozměry	Dle zadání viz příloha A	

3.1.3 VÝPOČET KONSTITUTIVNÍCH MATIC PŘI RŮZNÝCH PŘEDPOKLADĚCH SPOJENÍ VRSTEV

V našem případě se jedná o izotropní symetrickou desku. Tuhost izotropní vrstvy je dána výškou vrstvy t , modulem pružnosti E a Poissonovým součinitelem ν . Každá z vrstev má tedy tloušťku t_i a minimální a maximální z-souřadnici $z_{i,\min}$, $z_{i,\max}$ z nichž budou odvozeny a vypočítány konstitutivní matice.

	mm		mm	
$z_{1,\min}$	-8,38	t_1	8	sklo
$z_{1,\max}$	-0,38			
$z_{2,\min}$	-0,38	t_2	0,76	PVB folie
$z_{2,\max}$	0,38			
$z_{3,\min}$	0,38	t_3	8	sklo
$z_{3,\max}$	8,38			



Obr. 31 - Znázornění z_{\min} , z_{\max} (vpravo) a tlouštěk jednotlivých vrstev (vlevo)

2D výpočet se smykovým spřažením vrstev

Konstitutivní matice pro rovinnou napjatost každé vrstvy i se vypočte podle následujícího vztahu

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{i,11} & d_{i,12} & 0 \\ & d_{i,22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{i,33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & \frac{\mu_i E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ & \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.2)$$

Analogicky pro $i = 1, 2, 3$

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 = \begin{bmatrix} 73909.8 \times 10^6 & 16999.3 \times 10^6 & 0 \\ & 73909.8 \times 10^6 & 0 \\ \text{sym.} & & 28455.3 \times 10^6 \end{bmatrix} \text{ Pa}, \quad (3.3)$$

$$\mathbf{d}_2 = \begin{bmatrix} 3994.7 \times 10^3 & 1993.3 \times 10^3 & 0 \\ & 3994.7 \times 10^3 & 0 \\ \text{sym.} & & 1000.7 \times 10^3 \end{bmatrix} \text{ Pa.} \quad (3.4)$$

Jednotlivé vrstvy jsou spojeny do vrstevnaté skořepiny s následující konstitutivní maticí:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{17} & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & \text{sym.} & D_{27} & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & \text{sym.} & \text{sym.} & D_{38} \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

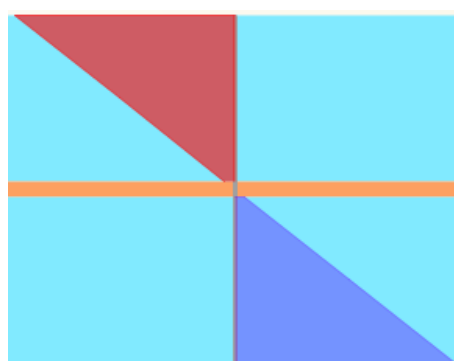
Protože je skladba vrstev symetrická, vypadne mimodiagonální submatice, která definuje excentricity, tj. rozdíl mezi střednicovou plochou a těžištěm tuhosti. Teoreticky nezávadný algoritmus získání konstitutivní matice vrstevnaté skořepiny z konstitutivních matic jednotlivých vrstev je uveden níže.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 28,99 & 6,67 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 28,99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 164,962 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 164,962 & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & 1,18 \times 10^6 & 0,27 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & 1,18 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & & 0,46 \times 10^6 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Celková konstitutivní matice pro desky se smykovým spřažením (vlevo)

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix}}_{\boldsymbol{\sigma}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \boxed{D_{11} \ D_{12} \ 0} & 0 & 0 & \boxed{D_{16} \ D_{17} \ 0} \\ & \boxed{D_{22} \ 0} & 0 & 0 & \text{sym.} \ D_{27} \ 0 \\ & & \boxed{D_{33}} & 0 & 0 & \text{sym.} \ \text{sym.} \ D_{38} \\ & & & \boxed{D_{44} \ 0} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \boxed{D_{55}} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & & \boxed{D_{66} \ D_{67} \ 0} \\ & & & & & & \boxed{D_{77} \ 0} \\ & & & & & & & \boxed{D_{88}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$$

Ohyb
 Smyk
 Membránové namáhání
 Excentricita



Obr. 32 - Průběh normálového napětí po výšce desky

Prvky konstitutivní matice (ohyb)

$$D_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^3 - z_{i,\min}^3}{3} d_{i,11} = 28,9936 \text{ kNm}, \quad (3.7)$$

$$D_{12} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^3 - z_{i,\min}^3}{3} d_{i,12} = 6,6685 \text{ kNm}, \quad (3.8)$$

$$D_{22} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^3 - z_{i,\min}^3}{3} d_{i,22} = 28,9936 \text{ kNm}, \quad (3.9)$$

$$D_{33} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^3 - z_{i,\min}^3}{3} d_{i,33} = 11,1625 \text{ kNm}. \quad (3.10)$$

Prvky konstitutivní matice (příčný smyk)

Výpočet smykových členů určuje kvalitu deskové teorie.

$$D_{44} = D_{55} = \max \left(D_{44/55, \text{calc}} \frac{48}{5l^2} \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{t_i^3}{12} - \frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{z_{\max,i}^3 - z_{\min,i}^3}{3}}}{1}} \right) = 164,962 \text{ kN/m}. \quad (3.11)$$

Kde l je střední velikost plochy ohraničeného rámečku. Hodnota $D_{44/55, \text{calc}}$ se vypočte:

$$D_{44/55, \text{calc}} = \frac{1}{\int_{-t/2}^{t/2} \frac{1}{G(z)} \left(\frac{\int_{-t/2}^{t/2} d_{11}(\bar{z})(\bar{z} - z_0) d\bar{z}}{\int_{-t/2}^{t/2} d_{11}(\bar{z})(\bar{z} - z_0)^2 d\bar{z}} \right)^2 dz}, \quad z_0 = \frac{\int_{-t/2}^{t/2} d_{11}(\bar{z}) \bar{z} d\bar{z}}{\int_{-t/2}^{t/2} d_{11}(\bar{z}) d\bar{z}}, \quad t = \sum_{i=1}^n t_i. \quad (3.12)$$

Prvky konstitutivní matice (membrána – rovinná napjatost)

$$D_{66} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,11} = 1182560 \text{ kN/m}, \quad (3.13)$$

$$D_{67} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,12} = 305990 \text{ kN/m}, \quad (3.14)$$

$$D_{77} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,22} = 1182560 \text{ kN/m}, \quad (3.15)$$

$$D_{88} = \sum_{i=1}^n t_i d_{i,33} = 455285 \text{ kN/m}. \quad (3.16)$$

Prvky konstitutivní matice (účinky excentricity)

$$D_{16} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^2 - z_{i,\min}^2}{2} d_{i,11} = 0 \text{ kNm/m}, \quad (3.17)$$

$$D_{17} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^2 - z_{i,\min}^2}{2} d_{i,12} = 0 \text{ kNm/m}, \quad (3.18)$$

$$D_{27} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^2 - z_{i,\min}^2}{2} d_{i,22} = 0 \text{ kNm/m}, \quad (3.19)$$

$$D_{38} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{i,\max}^2 - z_{i,\min}^2}{2} d_{i,33} = 0 \text{ kNm/m}. \quad (3.20)$$

Celkový vektor poměrných přetvoření se vypočte

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (3.21)$$

kde

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{a} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \\ -\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \varphi_y \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \varphi_x \\ \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (3.22)$$

Dále se napětí rozpočítá do jednotlivých vrstev podle vztahu

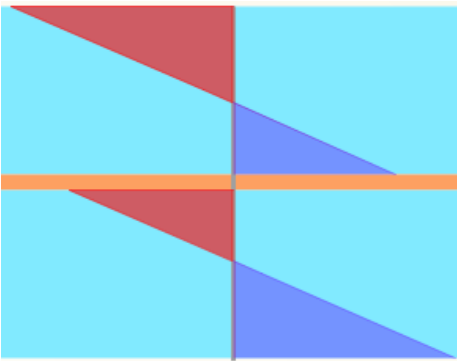
$$\boldsymbol{\sigma}_i(z) = \mathbf{d}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i(z), \quad (3.23)$$

kde

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(z) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \\ -\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (3.24)$$

3D

Celková materiálová matice tuhosti



Obr. 33 - Průběh normálového napětí po výšce desky

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

(3.25)

2D - Bez smykového spřažení vrstev

Konstitutivní matice pro rovinnou napjatost každé vrstvy i se vypočte podle následujícího vztahu

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{i;11} & d_{i;12} & 0 \\ & d_{i;22} & 0 \\ \text{sym.} & & d_{i;33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & \frac{\mu_i E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ & \frac{E_i}{1-\nu_i^2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_i \end{bmatrix}, \quad G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.26)$$

Analogicky pro $i = 1, 2, 3$

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 = \begin{bmatrix} 73909.8 \times 10^6 & 16999.3 \times 10^6 & 0 \\ & 73909.8 \times 10^6 & 0 \\ \text{sym.} & & 28455.3 \times 10^6 \end{bmatrix} \text{ Pa},$$

$$\mathbf{d}_2 = \begin{bmatrix} 3994.7 \times 10^3 & 1993.3 \times 10^3 & 0 \\ & 3994.7 \times 10^3 & 0 \\ \text{sym.} & & 1000.7 \times 10^3 \end{bmatrix} \text{ Pa.}$$

(3.27)

Matice tuhosti odpovídající i -té vrstvě je

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} D_{i,11} & D_{i,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{i,22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{i,33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{i,44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{i,55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{i,66} & D_{i,67} & 0 \\ & & & & & & D_{i,77} & 0 \\ & & & & & & & D_{i,88} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Kde obecně se jednotlivé členy vypočtou

$$D_{i,11} = \frac{t_i^3}{12} d_{i,11}, D_{i,12} = \frac{t_i^3}{12} d_{i,12}, D_{i,22} = \frac{t_i^3}{12} d_{i,22}, D_{i,33} = \frac{t_i^3}{12} d_{i,33}, \quad (3.29)$$

$$D_{i,66} = t_i d_{i,11}, D_{i,67} = t_i d_{i,12}, D_{i,77} = t_i d_{i,22}, D_{i,88} = t_i d_{i,33}, \quad (3.30)$$

$$D_{i,44} = \frac{5}{6} G_{i,11} t_i, D_{i,55} = \frac{5}{6} G_{i,22} t_i. \quad (3.31)$$

Analogicky pro $i = 1, 2, 3$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 3,153 & 0,725 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 3,153 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1,214 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 188200,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 188200,0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & 0,591 \times 10^6 & 0,136 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & 0,591 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & & 0,228 \times 10^6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 1,461 \times 10^{-7} & 0,729 \times 10^{-7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1,461 \times 10^{-7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0,366 \times 10^{-7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0,634 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0,634 & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & 3,036 & 1,515 & 0 \\ & & & & & & 3,036 & 0 \\ & & & & & & & 0,761 \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

$$\text{A celková globální matice tuhosti } \mathbf{D} = \sum_{i=1}^n \mathbf{D}_i \quad (3.33)$$

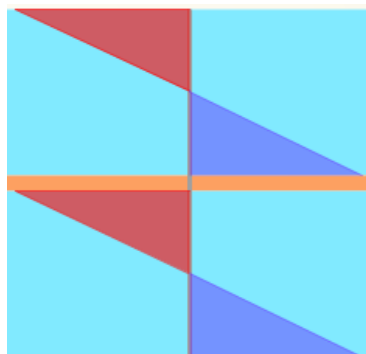
$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix}, \quad (3.34)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 6,307 & 1,451 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 6,307 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2,428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 376400,634 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 376400,634 & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & 1,182 \times 10^6 & 0,272 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & 1,182 \times 10^6 & 0 \\ & & & & & & & 0,455 \times 10^6 \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

Celková konstitutivní matice pro desky bez smykového spřažení vypadá následovně:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix}}_{\sigma} = \underbrace{\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{sym.} & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & D_{88} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}}_{\varepsilon}$$

Ohyb
 Smyk
 Membránové namáhání



Obr. 34 - Průběh normálového napětí po výšce desky

Tuhost v rámci jedné vrstvy je konstantní, proto použijeme zjednodušený výpočet členů celkové materiálové matice tuhosti.

Prvky konstitutivní matice (ohyb a kroucení)

$$D_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{11,i} = 6,307 \text{ kNm}, \quad (3.36)$$

$$D_{12} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{12,i} = 1,451 \text{ kNm}, \quad (3.37)$$

$$D_{22} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{22,i} = 6,307 \text{ kNm}, \quad (3.38)$$

$$D_{33} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^3}{12} d_{33,i} = 2,428 \text{ kNm}. \quad (3.39)$$

Prvky konstitutivní matice (smyk)

$$D_{44} = D_{55} = \sum_{i=1}^n \frac{5}{6} G_{11,i} t_i = 376400,634 \text{ kN/m}. \quad (3.40)$$

Prvky konstitutivní matice (membrána)

$$D_{66} = \sum_{i=1}^n t_i d_{11,i} = 1182560,316 \text{ kN/m}, \quad (3.41)$$

$$D_{67} = \sum_{i=1}^n t_i d_{12,i} = 271989,6894 \text{ kN/m}, \quad (3.42)$$

$$D_{77} = \sum_{i=1}^n t_i d_{22,i} = 1182560,316 \text{ kN/m}, \quad (3.43)$$

$$D_{88} = \sum_{i=1}^n t_i d_{33,i} = 455285,3134 \text{ kN/m}. \quad (3.44)$$

Po skončení výpočtu lineárních algebraických rovnic máme k dispozici krom deformace také celkový vektor vnitřních sil [9]

$$\sigma = D \epsilon, \quad (3.45)$$

kde ϵ je výsledný vektor přetvoření a D je celková materiálová matice tuhosti. Výsledný vektor napětí σ je rozdělen na jednotlivé vektory napětí σ_i , příslušící každé i -té vrstvě, které se vypočte:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad \text{kde} \quad \sigma = \begin{Bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_x \\ v_y \\ n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{a} \quad \sigma_i = D_i D^{-1} \sigma \quad \text{kde} \quad \sigma_i = \begin{Bmatrix} m_{i;x} \\ m_{i;y} \\ m_{i;xy} \\ v_{i;x} \\ v_{i;y} \\ n_{i;x} \\ n_{i;y} \\ n_{i;xy} \end{Bmatrix}. \quad (3.46)$$

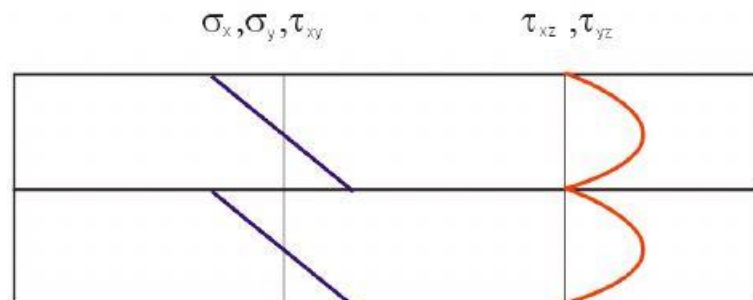
Celkový vektor σ přerozdělíme do jednotlivých vrstev na základě poměru matice tuhosti dané vrstvy k celkové, tzv. všech vrstev. Výsledkem je tolik celkových vektorů vnitřních sil, kolik je vrstev. V našem případě je tuhost v rámci jedné vrstvy konstantní, proto výpočet základních napětí bude vypadat podle nadcházejících vzorců. [9]

Napětí na kladném líci (na záporném líci se uvažuje znaménko „-“ mezi zlomky)

$$\sigma_{i;x} = \frac{n_{i;x}}{t_i} + \frac{6m_{i;x}}{t_i^2}, \quad \sigma_{i;y} = \frac{n_{i;y}}{t_i} + \frac{6m_{i;y}}{t_i^2}, \quad \tau_{i;xy} = \frac{n_{i;xy}}{t_i} + \frac{6m_{i;xy}}{t_i^2}. \quad (3.47)$$

Smykové napětí kolmo k rovině prvku

$$\tau_{i,yz} = \frac{3}{2} \frac{v_{i;y}}{t_i}, \quad \tau_{i,xz} = \frac{3}{2} \frac{v_{i;x}}{t_i}. \quad (3.48)$$



Obr. 35 - Ukázka průběhu napětí po výšce průřezu pro dvě nespřažené vrstvy za předpokladu konstantní tuhosti přes obě vrstvy (28)

3.1.4 ZÁVĚR PŘÍKLADU Č. 1

U vrstvených skel při 2D výpočtu se smykovým spřažením vrstev při určitém poměru modulu pružnosti folie a skla selhává vzorec pro výpočet smykových členů:

$$D_{44} = D_{55} = \max \left(D_{44/55, \text{calc}} \frac{48}{5l^2} \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{t_i^3}{12}}{\sum_{i=1}^n E_i \frac{z_{\max,i}^3 - z_{\min,i}^3}{3}}} \right).$$

Je to dáno členy ve jmenovateli $\frac{1}{\sum_{i=1}^n E_i \frac{t_i^3}{12}} - \frac{1}{\sum_{i=1}^n E_i \frac{z_{\max,i}^3 - z_{\min,i}^3}{3}}$, kdy při sumě tuhosti skla s vysokým

modulem pružnosti (tepelně tvrzené sklo $E = 70000$ MPa), je tuhost folie s nízkým modulem pružnosti (PVB $E = 3$ MPa) zanedbatelná a tím nám dává 2D výpočet zkreslené výsledky.

Postup výpočtu

Udělal jsem analýzu výpočtů, kdy jsem srovnávala 3D výpočet a 2D výpočet, kde jsem použila Mindlinovu teorii. Byla použita proto, jelikož nezanedbává smykové členy oproti Kirchhoffově teorii. Jak jsem psala v úvodu příkladu, aplikovala jsem tento výpočet na schod ze skleněného schodiště za použití daných parametrů. Na tomto schodu jsem měnila pouze řády modulu pružnosti folie, abych zjistila, kdy daný vzorec selhává. Modul pružnosti folie jsem volila v intervalu $\langle 30000; 3 \rangle$, kdy se vyrovnala řádově modulu pružnosti skla a byla snižována hodnotou 10 až na svou původní hodnotu. Konstantní zůstala skladba skla, zatížení, délka sítě a Poissonův součinitel viz Obr. 36

	zatížení [kN/m ²]	1000
	zjemnění sítě [m]	0,02
	Poissonův souč.	0,499
	skladba skla [mm]	8
		0,76
		8

Obr. 36- Konstantní parametry výpočtu poměru modulů pružnosti folie a skla

Zatížení: Hodnotu zatížení jsem zvolila tak, aby byly výsledky názornější.

Poissonův součinitel: Zůstal konstantní, aby nebylo měněno nic jiného, nežli moduly pružnosti.

Skladba skla: Původní skladba skla

Zjemnění sítě: Udělal jsem analýzu výpočtů, viz níže, kde jsem chtěla zjistit, jaká velikost konečných prvků dostačuje pro dané plochy (tělesa) schodu. Z Graf 1 a Graf 2 lze usoudit, že pro správnost výsledků dostačuje velikost sítě $l_{FE} = 0,020$ m

1. Tepelně tvrzené plavené sklo
2. PVB plí 22 °C zatížené do 3 min
3. Tepelně tvrzené plavené sklo

modul pružnosti [MPa]	70000
	30000
	70000

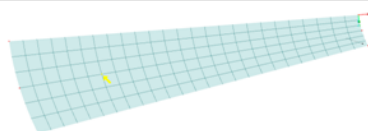
zatížení [kN/m ²]	1000
----------------------------------	------

skladba skla [mm]	8
	0,76
	8

Výpočet byl proveden pro bod č. 294. Je to bod, kde byl největší průhyb u_z , který byl zjištěn z programu RF-GLASS. V tomto bodě jsem spočítala σ_x a u_z pro 3D výpočet a 2D výpočet podle Mindlinovy teorie. Na následujících obrázcích bude vždy obrázek sítě prvků, kde žlutá šipka ukazuje posuzovaný bod; výsledky; souřadnice posuzovaného bodu a nakonec grafické znázornění výsledků průhybu u_z . Pro zjemnění větší jak 0,1m byly výsledky znatelně nepřesné.



zjemnění- l_{te} [m]	0,04
---------------------------	------

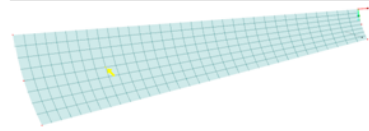


	σ_x [Mpa]	U_z [mm]
3D	92,760	2,927
MINDLIN		
2D se smyk.spřaž.	87,403	2,929

SOUŘADNICE BODU

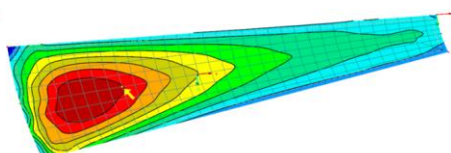
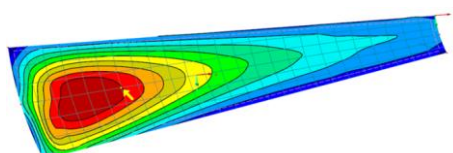
x	-0,75
y	0,155
z	0

0,03

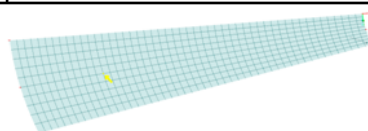


	σ_x [Mpa]	U_z [mm]
3D	92,893	2,948
MINDLIN		
2D se smyk.spřaž.	87,529	2,954

x	-0,748
y	0,155
z	0



zjemnění- l_{te} [m]	0,02
---------------------------	------

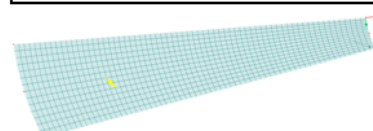


	σ_x [Mpa]	U_z [mm]
3D	93,990	2,965
MINDLIN		
2D se smyk.spřaž.	88,920	2,966

SOUŘADNICE BODU

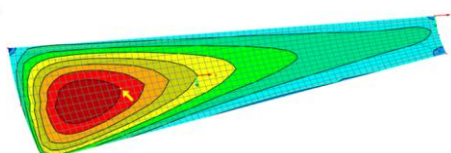
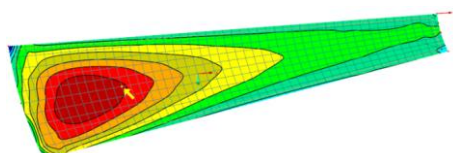
x	-0,75
y	0,155
z	0

0,015

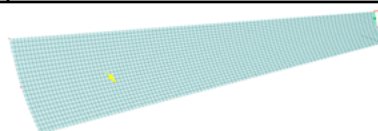


	σ_x [Mpa]	U_z [mm]
3D	94,003	2,966
MINDLIN		
2D se smyk.spřaž.	88,923	2,969

x	-0,752
y	0,155
z	0



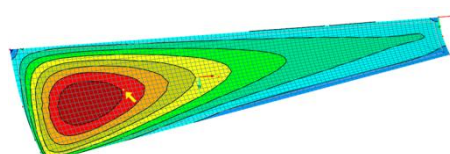
zjemnění- l_{te} [m]	0,01
---------------------------	------



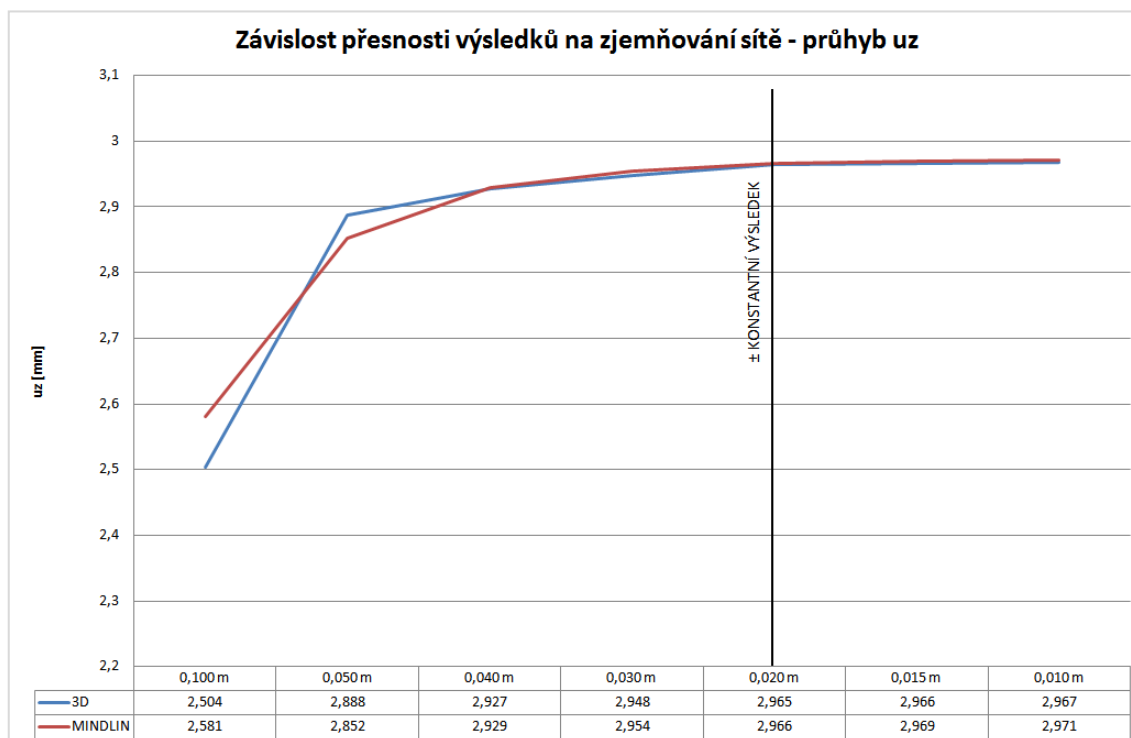
	σ_x [Mpa]	U_z [mm]
3D	94,077	2,967
MINDLIN		
2D se smyk.spřaž.	88,921	2,971

SOUŘADNICE BODU

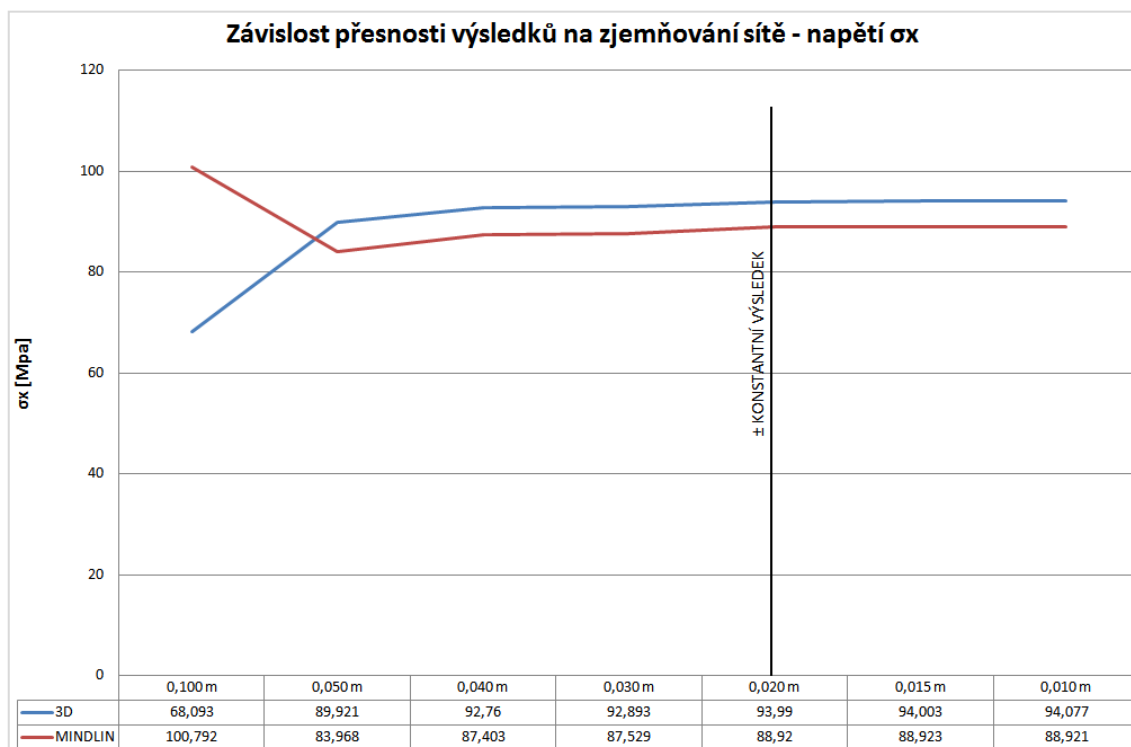
x	-0,75
y	0,155
z	0



Přehled výsledků:

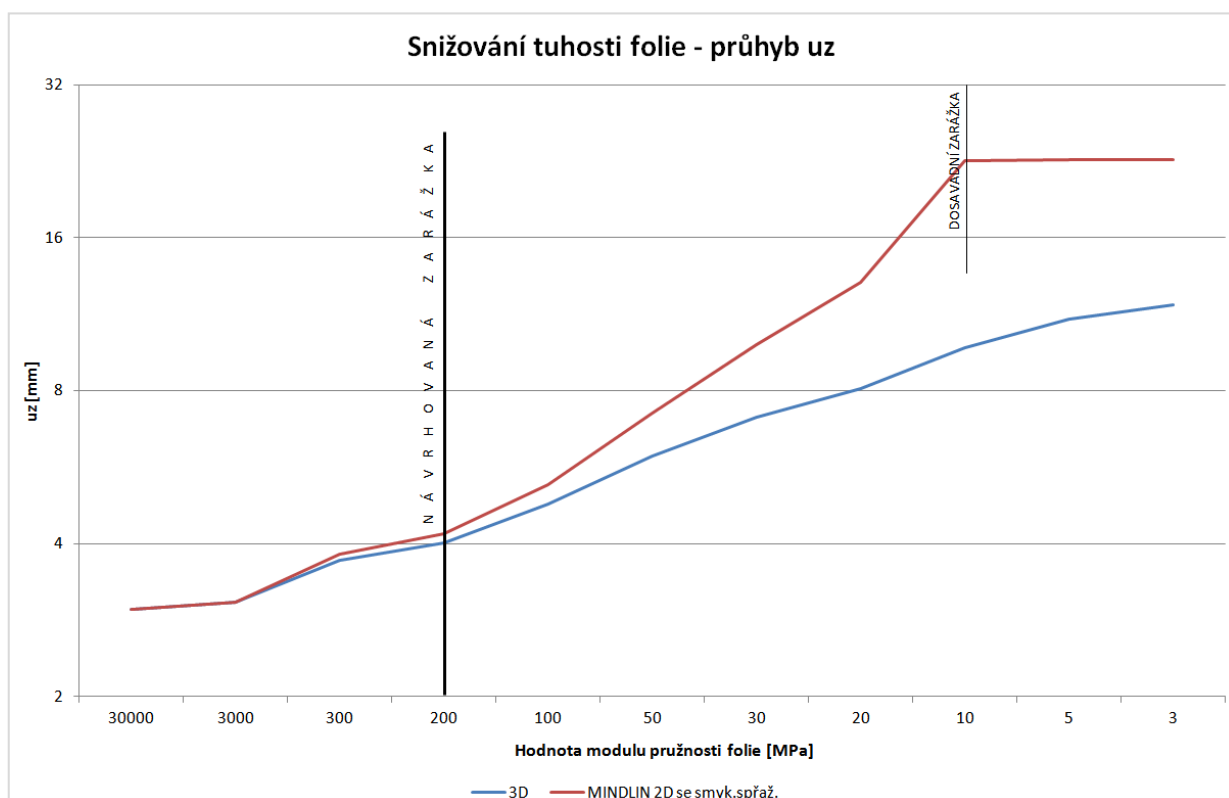


Graf 1 - Průhyb uz



Graf 2 – Napětí σ_x

Shrnutí:



Graf 3 – Zobrazení přesnosti výsledků dle závislosti poměru tuhostí jednotlivých vrstev

Na Graf 3 vidíme, že jsem hodnoty mezi 300-30-3 zjemnila. Bylo to z důvodu, že původně mezi těmito hodnotami byly velké skoky.

	3D [mm]	MINDLIN [mm]
[Mpa]	u_z [mm]	u_z [mm]
30000	2,965	2,966
3000	3,069	3,065
300	3,715	3,809
200	4,012	4,176
100	4,778	5,222
50	5,956	7,227
30	7,083	9,841
20	8,072	13,072
10	9,734	22,677
5	11,084	22,749
3	11,805	22,749

Obr. 38 - Průhyb desky při snižování modulu pružnosti folie (první sloupec modul pružnosti)

Podle Graf 3 mohu navrhnout, aby od poměru modulu pružnosti folie a skla, neboli od poměru $200 / 70000 = 0,003$ a menšího bylo počítáno vždy pomocí těles. Do tohoto poměru ($1 - 0,003$) můžeme použít zjednodušenou 2D úlohu. Jinak řečeno, v případě, že je modul pružnosti folie o 2 a více řádů menší než modul pružnosti skla, daný vzorec selhává, a je nutné počítat složitější 3D úlohu. Také bych zde doporučila navrhnout záražku smykové tuhosti.

Druhý závěr:

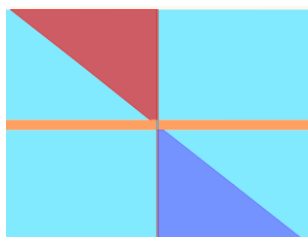
Pro 2D výpočet existují 2 deskové teorie, Mindlinova a Kirchhoffova neboli teorie tenkých a tlustých desek. Rozdělení je podle poměru t/L , kde t je celková tloušťka desky a L je nejmenší půdorysný rozměr.

- Pokud $1/50 < t/L < 1/10$ jedná se o **tenké desky**, kde se používá tzv. technická teorie ohybu desek založená na *Kirchhoffových* předpokladech, kde se zanedbává smyk.
- Pokud $1/10 < t/L < 1/5$ jedná se o **tlusté desky** a uplatňuje se zde výrazně vliv smykových deformací γ_{zx} a γ_{yz} a používá se *Mindlinova teorie*.
- Pokud je $1/5 < t/L$ jedná se o **desková tělesa** a je nutné zvolit *3D řešení*.
- Velmi tenké desky $t/L < 1/50$ se chovají spíše jako **membrány (skořepiny)** a do kategorie desek nepatří [11]

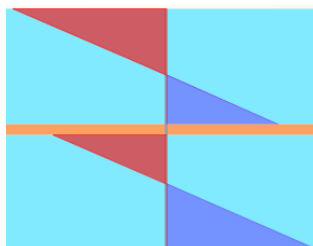
V praxi se vyskytují jak tenké skleněné desky, tak tlusté. Za normálních podmínek by se jednoduše měla podle poměru t/L zvolit potřebná teorie a dle ní zvolit výpočet (Kirchhoff, Mindlin nebo 3D). Z předchozí teorie však již víme, že poměr modulů pružnosti folie a skla je značný ($E_f/E_s = 3/70000 = 4,3 \cdot 10^{-5}$) z toho důvodu by se mělo při každém výpočtu udělat několik výpočtů, při kterých by se zjistilo, který výsledek je správný (která teorie je správná). Proto jsem udělala analýzu výpočtů, která by měla uživatelům usnadnit práci a ukázat, které metody jsou, při výpočtu vrstvených skel, nejvhodnější.

Z následujících obrázků, které jsou již použity výše, konkrétně Obr. 32, 33 a 34, je vidět, že pro použitou skladbu schodu, by se měl výpočet bez smykového spřažení blížit 3D řešení a při $\sum t = 16,76 \text{ mm}$ a $t/L = 16,76/123 = 0,136$ se řadí při 2D výpočtu do Mindlinovy teorie, což by se mělo ukázat na výsledných grafech.

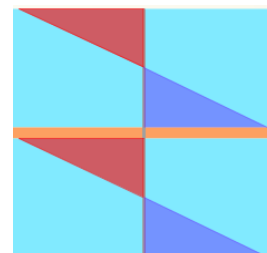
2D se smykovým spřažením



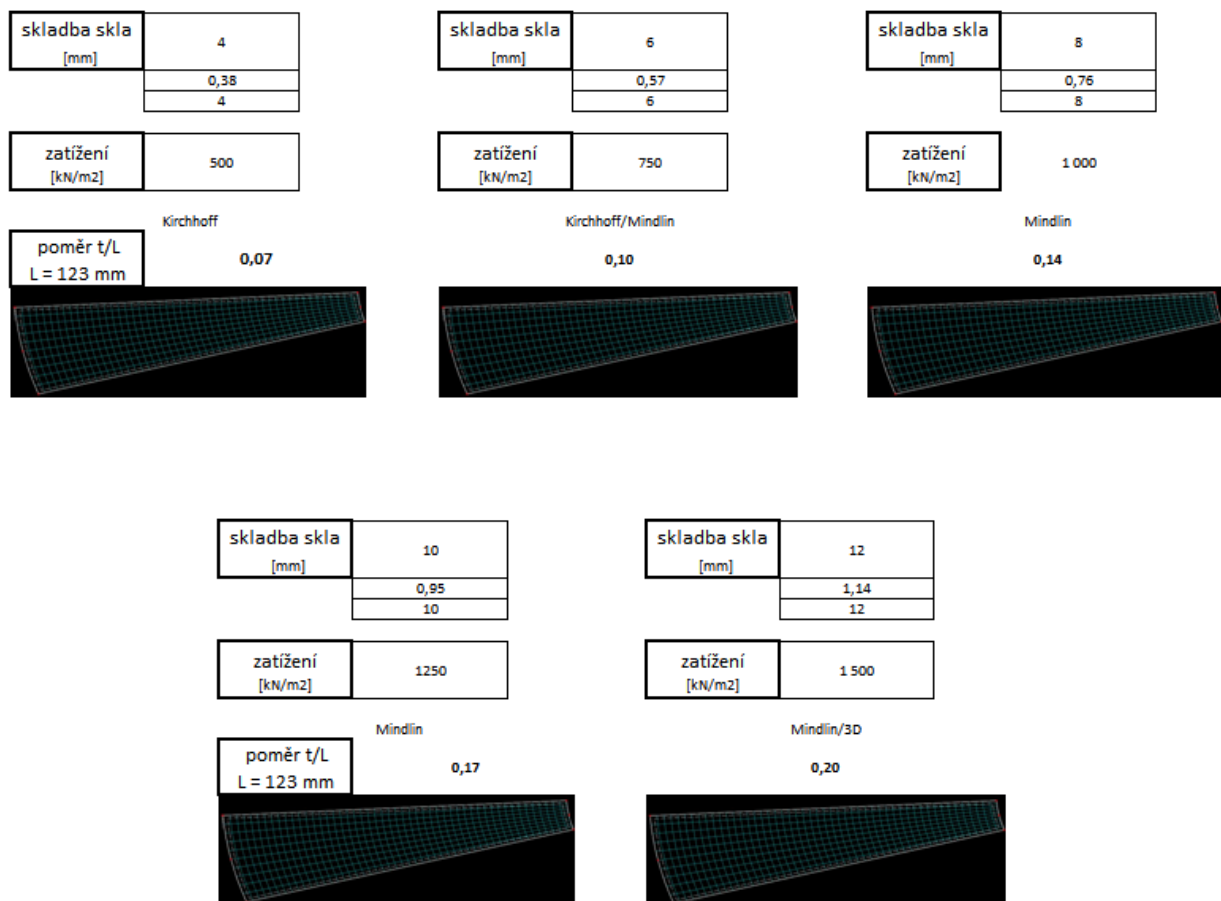
3D



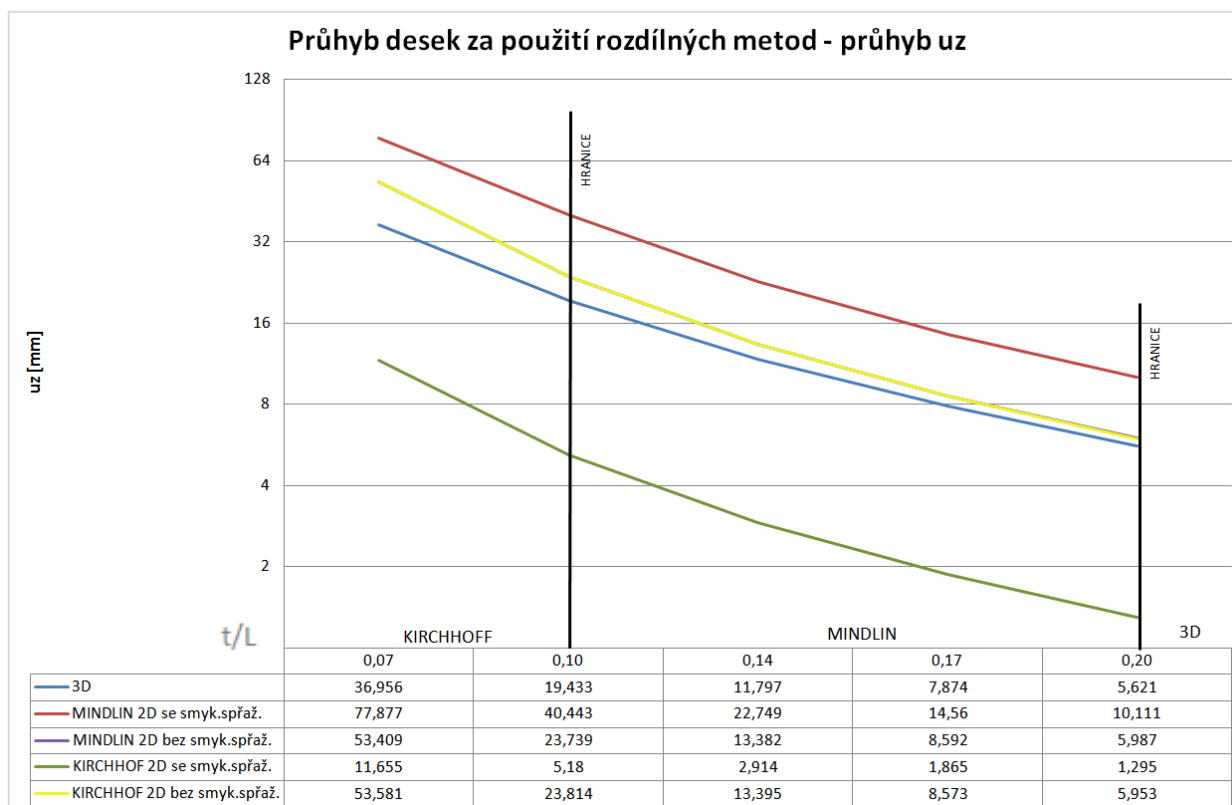
bez smykového spřažení



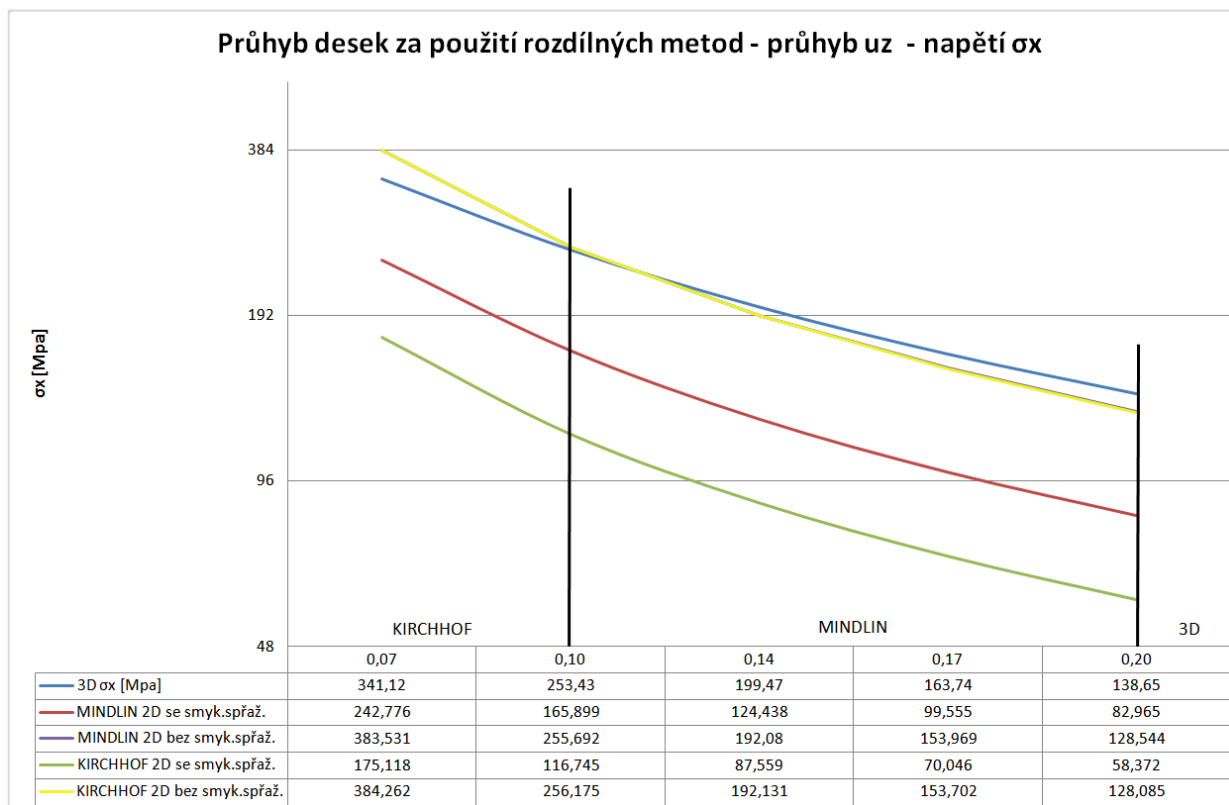
Již z výsledků výše víme, že stačí dělení sítě $I_{FE} = 0,020 \text{ m}$. Abych dosáhla přehledných výsledků, měnila jsem skladbu schodu tak, aby byl neustále zachován poměr tloušťek a odpovídající zatížení. Vycházela jsem opět z původní skladby a ze zatížení, které je na Obr. 36. Vše je názorně zobrazeno na nadcházejících obrázcích.



V grafech níže znázorňuje vodorovná osa poměr t/L a v tabulce jsou uvedeny hodnoty výsledků (σ_x a u_z).



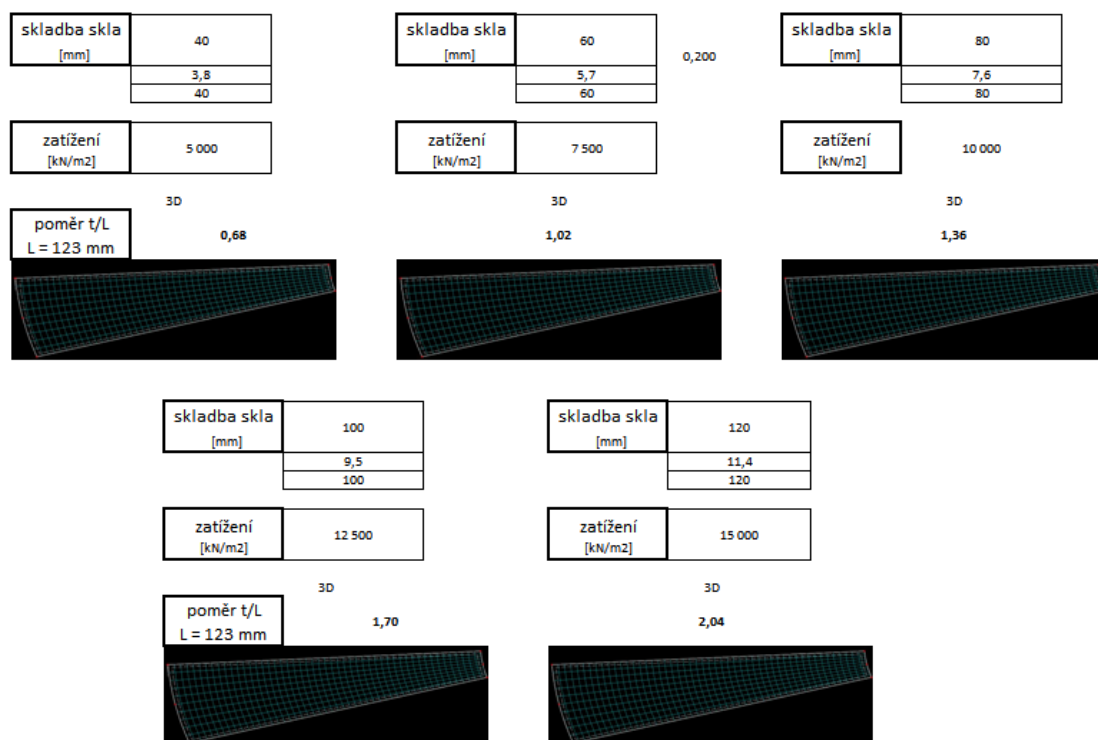
Graf 4

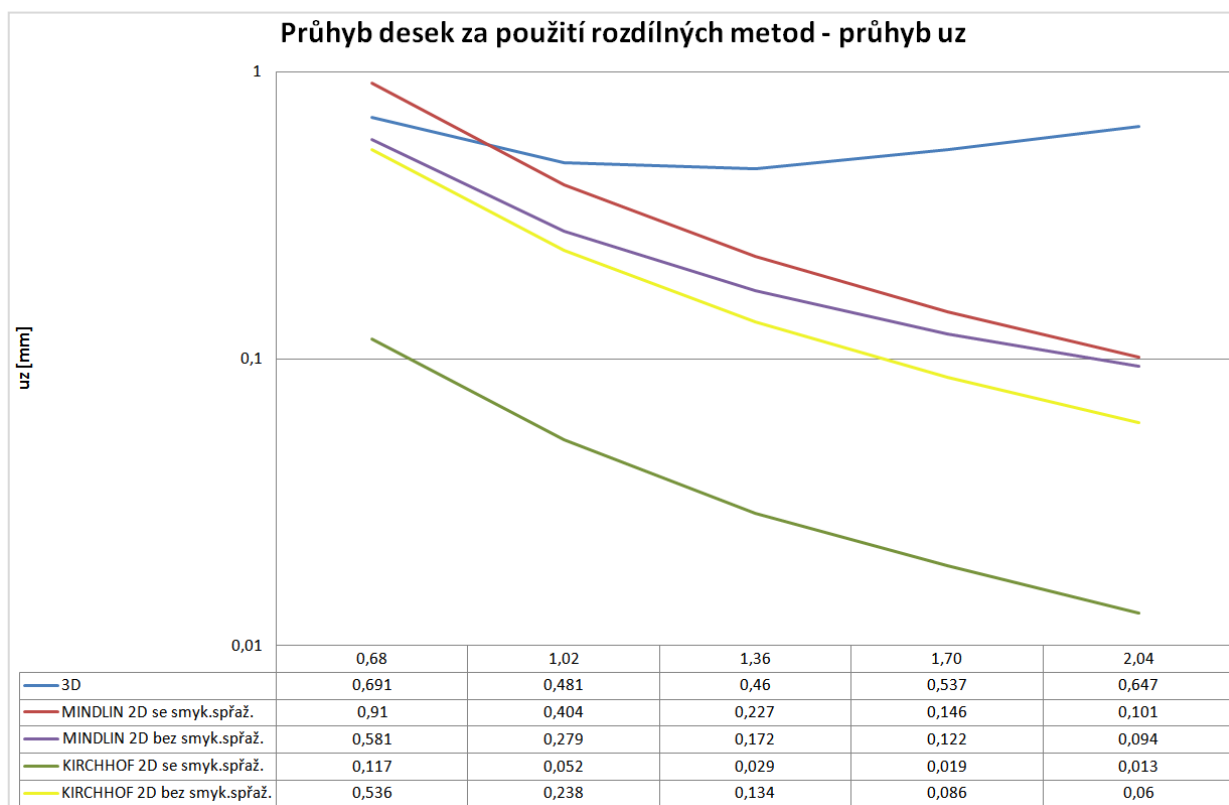


Graf 5

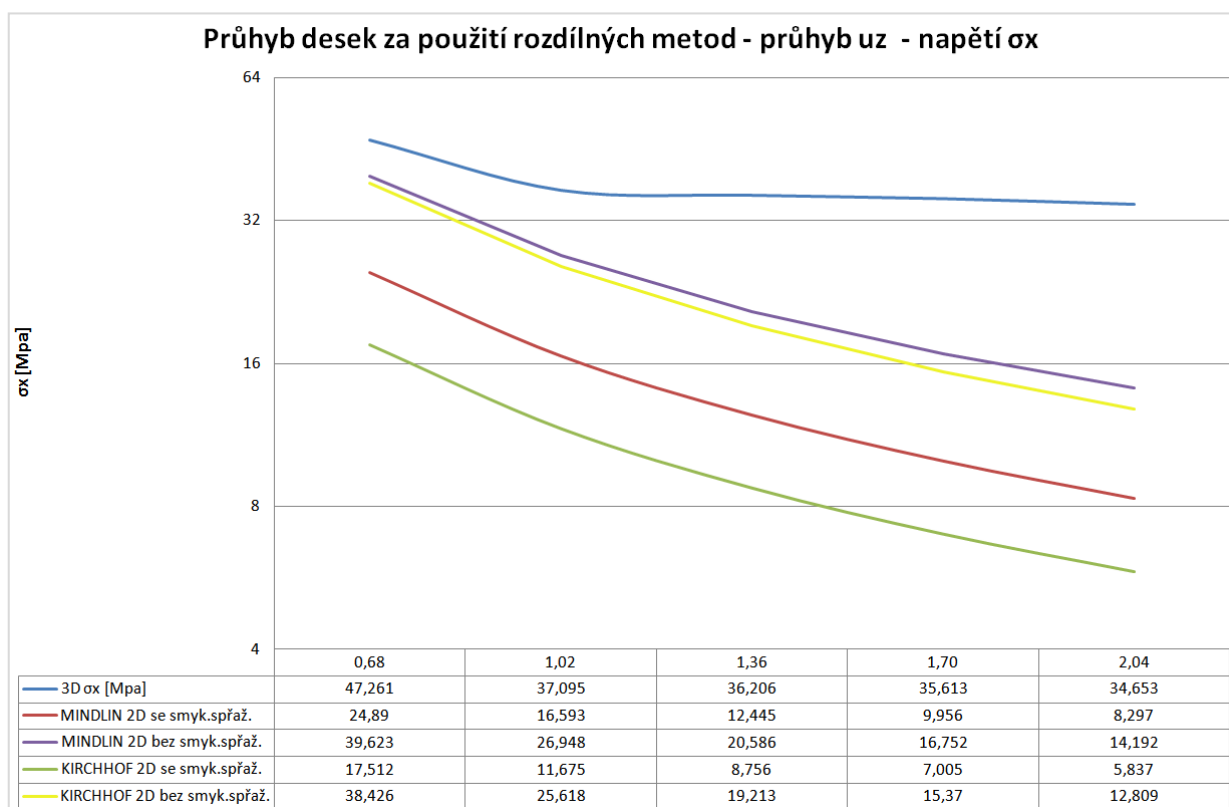
Z Graf 4 a z Graf 5 se potvrdilo, že výsledky ze 2D výpočtu bez smykového spřažení vrstev jsou téměř totožné s výsledky ze 3D výpočtu. Přesněji z daných grafů mohou vyvodit závěr, že pokud bude u počítané desky z vrstveného skla, poměr t/L patřit \pm do intervalu pro Mindlina, můžeme použít 2D výpočet bez smykového spřažení vrstev. 2D výpočet se smykovým spřažením nelze použít vůbec, jelikož odpovídající teorie výpočtu neodpovídá teorii pro 3D, tedy realitě lepených skleněných tabulí.

Jak jsem uvedla v úvodu příkladu č. 1, problém u deskových teorií nastává taktéž u příliš tlustých desek, neboli pokud je $1/5 < t/L$ nelze použít 2D úlohu a je potřeba 3D řešení. Splnění nerovnice $1/5 < t/L$ nastává ve všech následujících případech:





Graf 6



Graf 7

Z Graf 6 a z Graf 7 je možno vyvodit závěr, že pro větší tloušťky skleněných tabulí je nutno použít 3D model. Je-li počítána deska z vrstveného skla a platí poměr $1/5 < t/L$ kde t je celková tloušťka desky a L je nejmenší půdorysný rozměr, je nutno daný model vymodelovat pomocí těles, jinak jsou získány špatné výsledky.

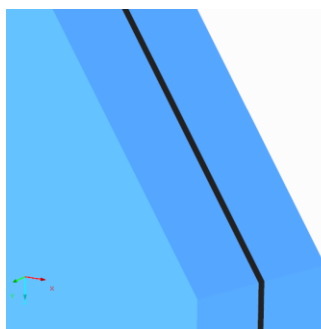
3.1.5 KYVADLOVÁ ZKOUŠKA



Obr. 39 - Kyvadlová zkouška [4]

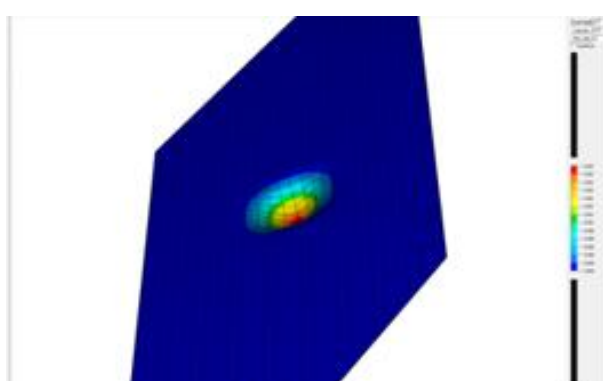
Bude-li mít vrstvené sklo zábradelní funkci, je nezbytné u navržené tabule skla provést zkoušku odolnosti proti nárazu, nazývanou „Kyvadlová zkouška“. Tato zkouška se řídí normou ČSN EN 12600 - Sklo ve stavebnictví - Kyvadlová zkouška - Metoda zkoušení nárazem a klasifikace pro ploché sklo, kde jsou popsány veškeré postupy a nařízení, jak ji správně provést. Jako kyvadlo jsou zde použity 2 pneumatiky, viz Obr. 39, které váží 50kg. Ty jsou puštěny z předepsané výšky do středu tabule a hodnotí se, jak moc bylo sklo porušeno a zařadí se do normou dané kategorie. Tato zkouška se provádí, aby se vyzkoušelo, zda navržená tabule skla odolá případnému útoku lidí, kopnutí, bouchnutí.

Výpočet byl aplikován na zábradelní desku ze skleněného schodiště.

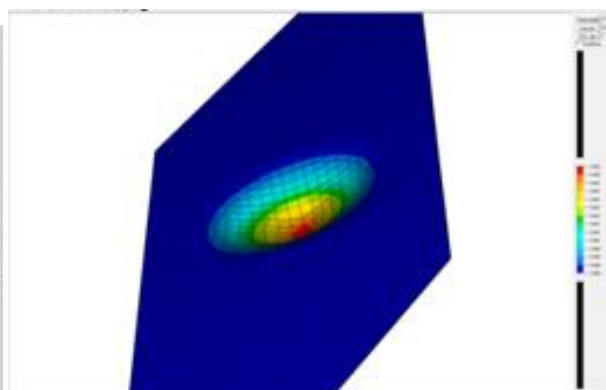


Obr. 40 - Skladba zábradlí

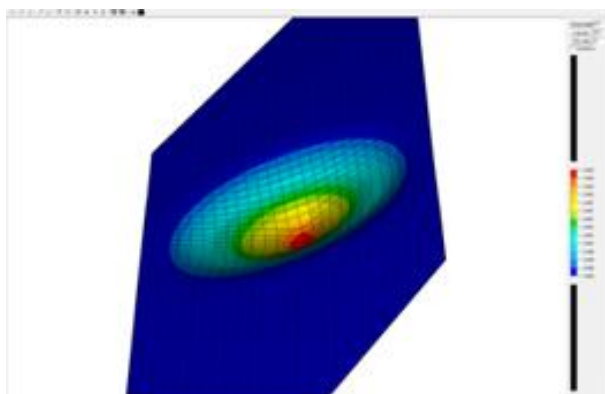
Výpočet probíhal explicitní metodou, která je popsána v 1.3.2.1a.2.2.1 Explicitní metody. Na obrázcích jsou znázorněny výsledky. Lze pozorovat šíření vlny od nárazu po ploše tabule. Bylo vybráno 10 názorných kroků, kde jeden krok představuje $2 \cdot 10^{-6}$ s. Výsledky jsou 20x zvětšeny.



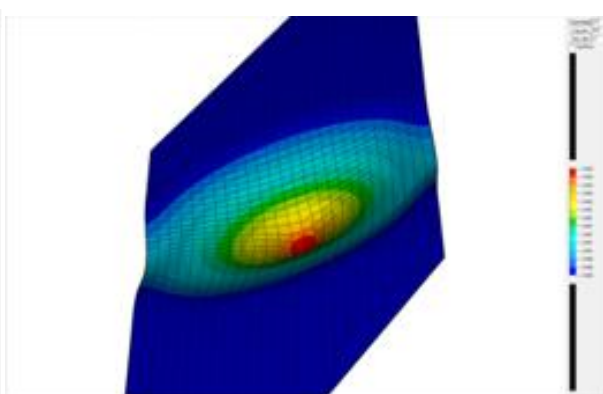
Obr. 41 - 1. krok



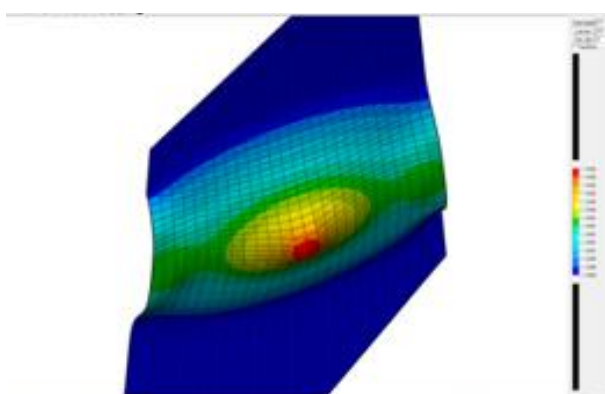
Obr. 42 - 2. krok



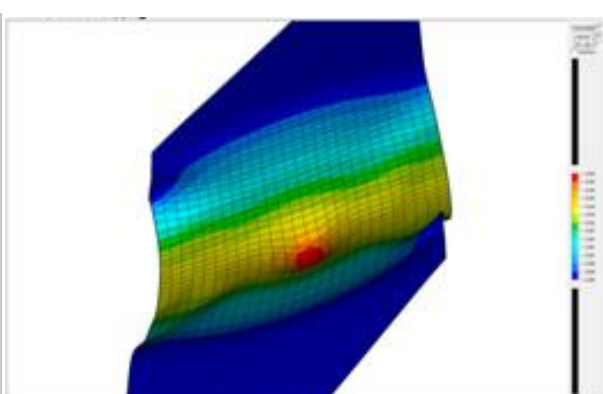
Obr. 43 - 3. krok



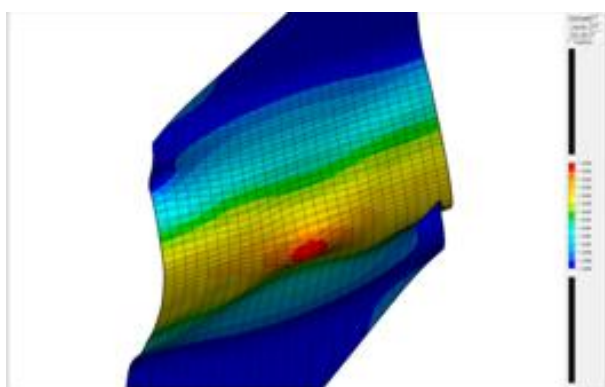
Obr. 44 - 4. krok



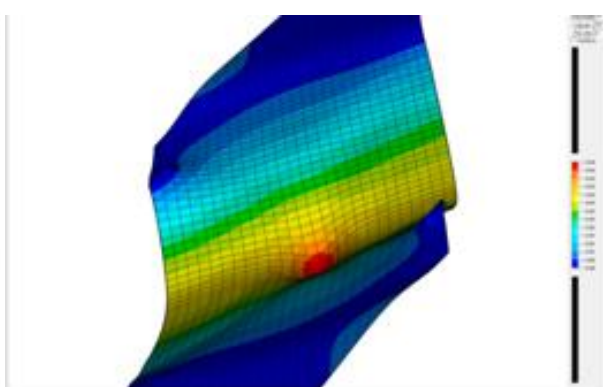
Obr. 45 - 5. krok



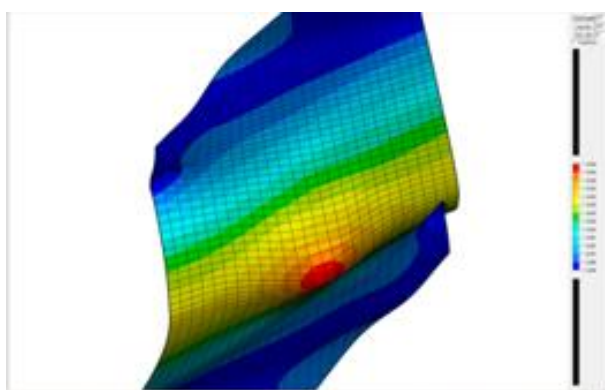
Obr. 46 - 6. Krok



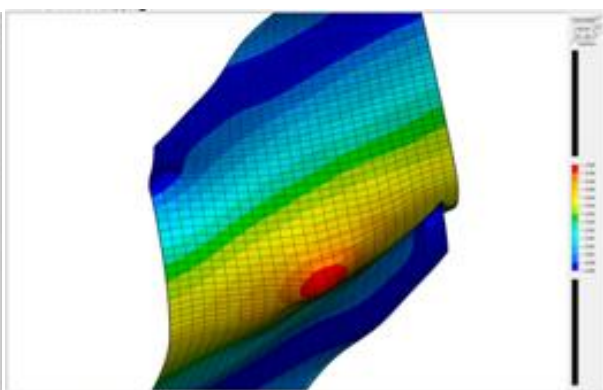
Obr. 47 - 7. Krok



Obr. 48 - 8. Krok



Obr. 49 - 9. Krok

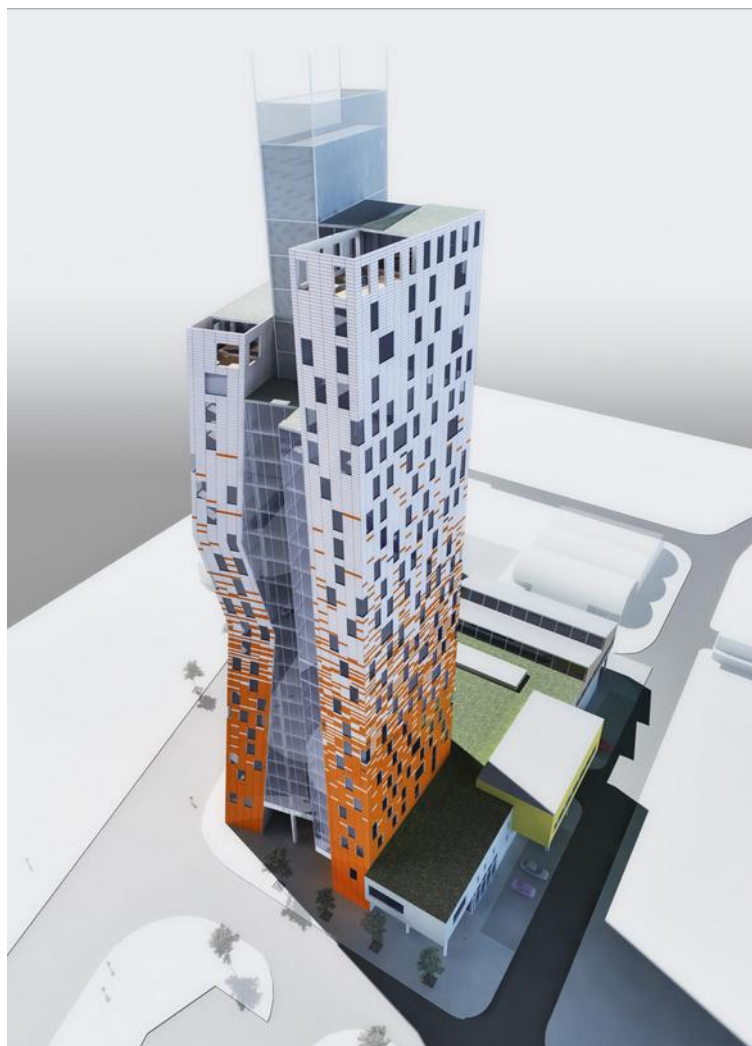


Obr. 50 - 10. krok

4. Izolační sklo

Aby nebylo sklo počítáno jen tak smyšleně, zasadila jsem tento příklad do budovy AZ Tower, která se nachází v Brně. Od firmy Properity s.r.o., která měla na starosti celý projekt, jsem získala podklady ke sklům, viz Příloha 3. Firma Properity s.r.o. mi dodala pouze rozměry skel, zbytek byl dopočítán dle klasických pravidel. Výpočet větru v 5m a 110m byl počítán dle normy ČSN EN 1991-1-4 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem. Skladba skel byla zvolena tak, aby sklo odolalo daným zatížením. Zatížení od změny tlaku, objemu a teploty je počítán samotným RFEM 5, přesněji modulem určeným pro výpočet skel RF-GLASS. Podrobný popis je uveden v následujících kapitolách. V tomto příkladu chci poukázat na chování izolačních dvojskel a trojskel v letním a zimním období; jak velké rozdíly nastanou mezi dvojsklem a trojsklem v 5 a 110m, čili co bude ekonomičtější variantou.

Vizualizace AZ Tower Brno



Obr. 51 - Vizualizace AZ Tower [22]

4. ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA U IZOLAČNÍCH SKEL

Jak je popsáno v kapitole Izolační sklo (insulating glass unit (IGU)), jedná se o desku, kde mezi skly, je komora naplněna plynem. Plyn způsobuje nelinearitu a výpočet izolačních skel probíhá vždy teorií III. řádu, tj. teorií velkých deformací, za použití Newton-Raphsonovy metody. Skleněné tabule jsou modelovány tělesovými, nebo skořepinovými prvky. Plynové komory jsou modelovány objemovými plynovými prvky, které nemají tuhost materiálu, ale řídí se stavovou rovnicí plynů. Při výpočtu se pak vychází ze stavové rovnice pro ideální plyn.

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = k. \quad (4.1)$$

Pro určení konstanty stavové rovnice je potřeba skutečných hodnot tlaku, objemu a teploty v nějakém časovém okamžiku, např. při výrobě (p_0, V_0, T_0) . K tomuto stavu, tedy např. výrobě, se musí počítat změny tlaku, objemu a teploty.

$$\frac{(p_0 + \Delta p) \cdot (V_0 + \Delta V)}{(T_0 + \Delta T)} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = k. \quad (4.2)$$

Tedy pro změnu objemu a teploty se vypočte změna vnitřního tlaku

$$\Delta p = k \frac{T_0 + \Delta T}{V_0 + \Delta V} - p_0 = k \left(\frac{T_0 + \Delta T}{V_0 + \Delta V} - \frac{T_0}{V_0} \right). \quad (4.3)$$

Neuvažuje se změna teploty, bude tedy vše přepočtené na teplotu T_0

$$\frac{(p_0 + \Delta p)(V_0 + \Delta V)}{\left(1 + \frac{\Delta T}{T_0}\right)} = p_0 V_0 = k T_0 = \bar{k}. \quad (4.4)$$

Po dosazení se vypočítá změna vnitřního tlaku

$$\Delta p = p_0 V_0 \frac{1 + \frac{\Delta T}{T_0}}{V_0 + \Delta V} - p_0 = p_0 \left(\frac{V_0 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0}\right)}{V_0 + \Delta V} - 1 \right). \quad (4.5)$$

Zatížení:

Vnitřní primární změna tlaku

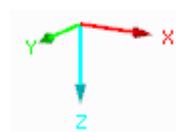
$$\Delta p_{prim} = p - p_0 = \frac{\Delta T}{T_0} p_0. \quad (4.6)$$

Vnější změna tlaku oproti p_0 se zadá jako plošné zatížení.

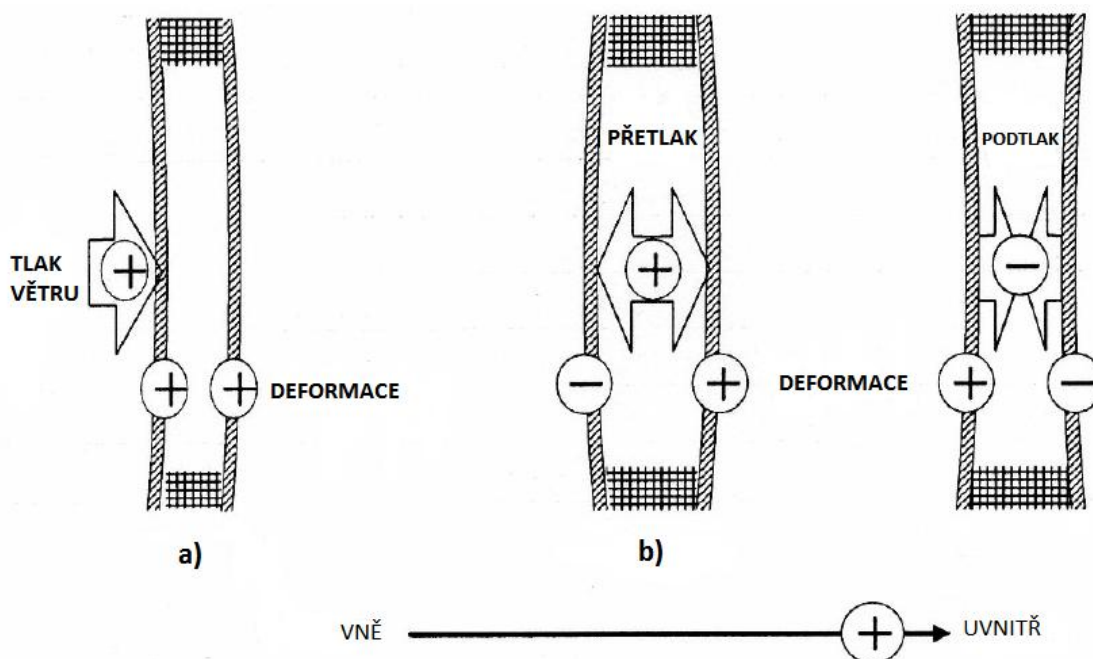
4.1 PŘÍKLAD Č. 2 – IZOLAČNÍ DVOJSKLA A TROJSKLA

Průhyb a napětí skla u AZ Tower bude, jak bylo řečeno výše, počítáno v 5m a 110m. Výpočet větru nebude uveden. Byl spočítán klasickou metodou dle normy ČSN EN 1991-1-4, pro Brno, které se nachází ve větrové oblasti II a kategorie terénu III. Možná by bylo diskutabilní, zda se AZ Tower nenachází v terénu IV, proto jsem zvolila horší variantu, tedy kategorii terénu III. Izolační skla jsou zatěžována nejen větrem, ale i klimatickým zatížením. Je to způsobeno tím, že izolační skla se vyrábějí a montují na jiných místech. Abychom byli přesnější, vyrábějí se a montují při různých nadmořských výškách, při jiných teplotách a jiném atmosférickém tlaku plynu. Toto všechno má za důsledek, že změna vnitřního tlaku a změna výšky vyvolá změnu zatížení na skla a změna teploty vyvolá tepelné zatížení celého plynu. V kapitolách 1.1.4.1.1 - 1.1.4.1.6 jsou uvedeny parametry, které vstupují do všech výpočtů týkající se izolačních skel.

Ve výsledcích u průhybů budou vždy uvedeny šipky a znaménko, které nám ukáží směr průhybu horní a spodní desky. Záporné znaménko znamená průhyb směrem nahoru, kladné ve směru dolů.

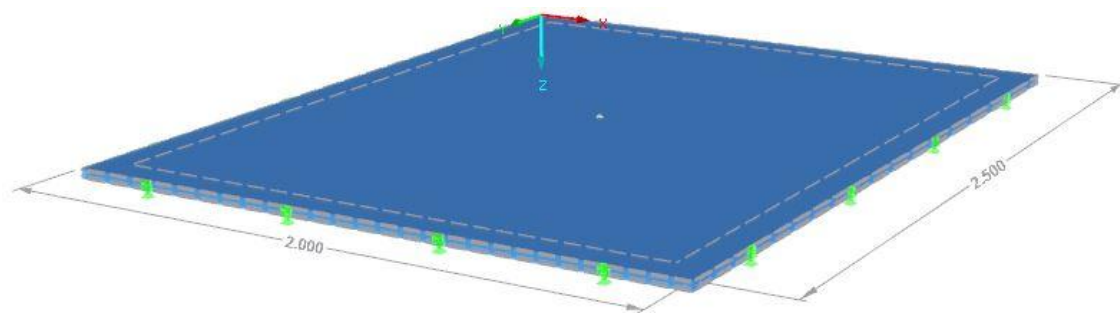


Dílním cílem tohoto výpočtu je ukázat jak se prohýbají tabule skla tlakem větru a průhyb skel v letním a zimním období a tomu odpovídající napětí. Průhyby by měly vypadat následovně

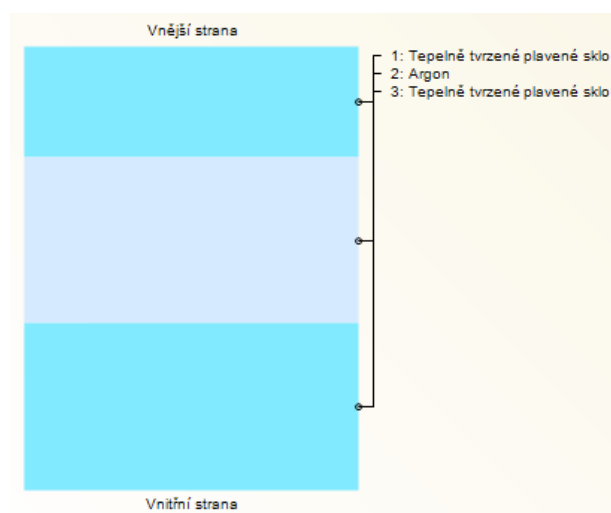


Obr. 52 - Průhyb skla a) Od tlaku větru b) vlevo: letní období; vpravo: zimní období [12]

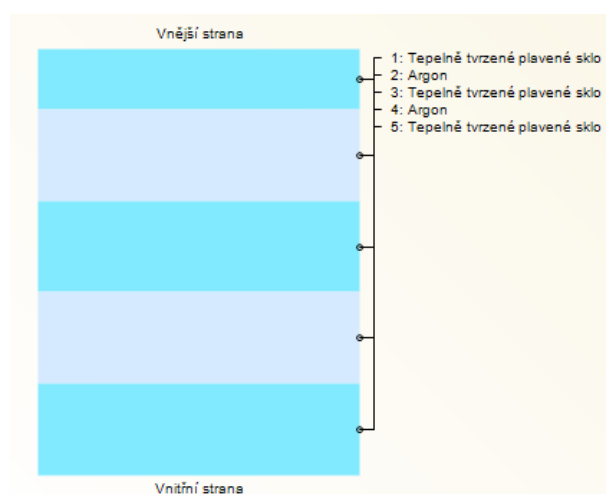
4.1.1 MODEL IZOLAČNÍHO DVOJSKLA A TROJSKLA



4.1.2 SKLADBA DVOJSKLA A TROJSKLA


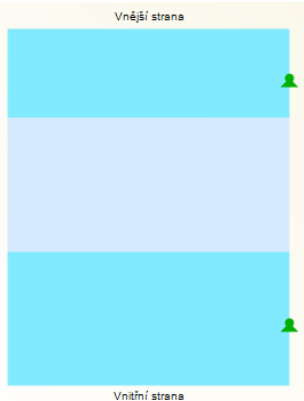


Obr. 53 - Skladba dvojskla




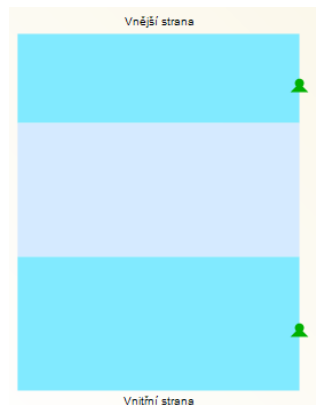
Obr. 54 - Skladba trojskla

4.1.3 VSTUPNÍ PARAMETRY DVOJSKLA

1. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_1	70000	MPa
	Smykový modul	G_1	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_1	0.230	
	Tloušťka vrstvy	t_1	8	mm
2. Vrstva – PLYN	Typ plynu	Argon		
	Objemová tíha	γ_2	0.020	kN/m ³
	Hustota	ρ_2	1.800	kg/m ³
	Tloušťka vrstvy	t_2	12	mm
3. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_3	70000	MPa
	Smykový modul	G_3	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_3	0.230	
	Tloušťka vrstvy	t_3	12	mm
Zatížení	Vítr	$w_{e,5m}$	0.450	kN/m ²
		$w_{e,110m}$	1.214	kN/m ²
Rozměry	Délka ve směru x	l_x	2000	mm
	Délka ve směru y	l_y	2500	mm
	Celková tloušťka	t	32	mm
Okrajové podmínky	Po celém obvodě	<p>Lokální</p>  <p>Lokální vztažný systém je definován následovně</p>	$u_x = u_y = u_z = \varphi_z = 0$ 	

4.1.4 VSTUPNÍ PARAMETRY TROJSKLA

1. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_1	70000	MPa
	Smykový modul	G_1	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_1	0.230	
	Tloušťka vrstvy	t_1	8	mm
2. Vrstva – PLYN	Typ plynu	Argon		
	Objemová tíha	γ_2	0.020	kN/m ³
	Hustota	ρ_2	1.800	kg/m ³
	Tloušťka vrstvy	t_2	12	mm
3. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_3	70000	MPa
	Smykový modul	G_3	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_3	0.230	
	Tloušťka vrstvy	t_3	12	mm
4. Vrstva – PLYN	Typ plynu	Argon		
	Objemová tíha	γ_2	0.020	kN/m ³
	Hustota	ρ_2	1.800	kg/m ³
	Tloušťka vrstvy	t_2	12	mm
5. Vrstva - SKLO	Typ skla	Tepelně tvrzené sklo		
	Modul pružnosti	E_3	70000	MPa
	Smykový modul	G_3	28 455	MPa
	Poissonovo číslo	ν_3	0.230	
	Tloušťka vrstvy	t_3	12	mm
Zatížení	Vítr	$w_{e,5m}$	0.450	kN/m ²
		$w_{e,110m}$	1.214	kN/m ²
Rozměry	Délka ve směru x	l_x	2000	mm

	Délka ve směru y	I_y	2500	mm
	Celková tloušťka	t	56	mm
Okrajové podmínky	Po celém obvodě	<p>Lokální</p> 	$u_x = u_y = u_z = \varphi_z = 0$ 	

4.1.5 VÝPOČET/MODELOVÁNÍ SKEL

Teorie výpočtu

☐ I. řád (lineární výpočet)

☒ III. řád - nelineární (metoda velkých deformací)

☐ Newton-Raphsonova s konstantní maticí tuhosti

☒ Newton-Raphsonova

 Počet přírůstků zatížení:

Modelování vrstveného skla

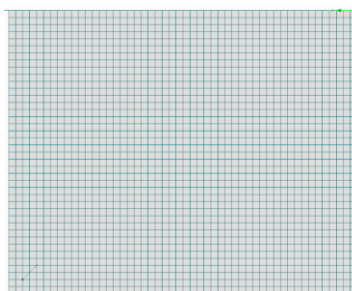
☐ 3D, pokud je poměr ($G t / G t_f$) větší než:

☒ 3D

4.1.6 DĚLENÍ SÍTĚ

Požadovaná délka konečných prvků

IFE: [m]



Obr. 55 - Dělení sítě izolačního skla

4.1.7 PARAMETRY KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ PRO 5M

Sklo se vyrábí při teplotě T_p , tlaku p_p a počátečním objemu (dané mezivrstvy) plynu V_0 . Zatížení změnou teploty se převádí na změnu okolního tlaku p_{out} . Okolní tlak p_{out} , zahrnující změnu atmosférického tlaku přepočteného na hladinu moře Δp_{met} , vliv oteplení plynu ΔT a změnu okolního tlaku změnou výšky je dán vztahem [8]

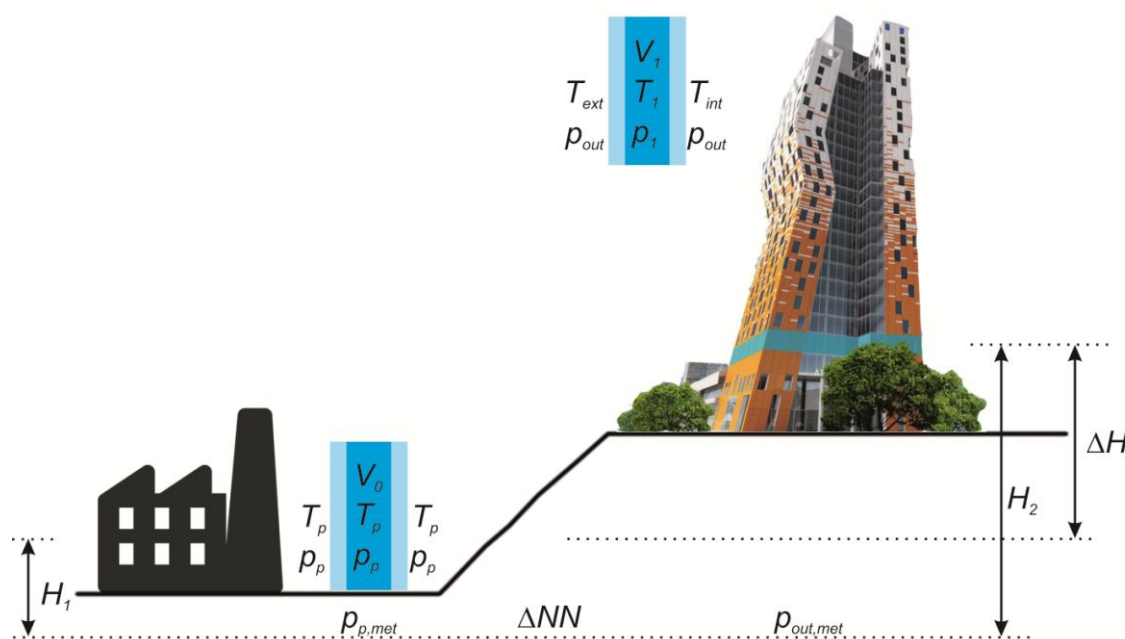
$$\begin{aligned} p_{out} &= p_p + \Delta p_{met} - c_2 \Delta H, \\ \Delta p_{met} &= p_{out,met} - p_{p,met}, \\ \Delta T &= T_1 - T_p, \\ \Delta H &= H_2 - H_1, \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde

$$c_2 = 12 \text{ Pa/m}. \quad (4.8)$$

Řešení dále splňuje rovnici rovnováhy

$$p_p V_0 = p_1 V_1. \quad (4.9)$$



H_1	Nadmořská výška při výrobě	$p_{p,met}$	Atmosférický tlak při hladině moře (výroba)
H_2	Nadmořská výška při montáži	$p_{p,out}$	Atmosférický tlak při hladině moře (montáž)
ΔH	Rozdíl nadmořských výšek $H_2 - H_1$	p_p	Tlak při výrobě
T_p	Teplota při výrobě	p_{out}	Venkovní tlak v místě montáže
T_{ext}	Teplota na vnější straně skla (montáž)	p_1	Tlak plynu v místě montáže
T_{int}	Teplota na vnitřní straně (montáž)	V_0	Počáteční objem plynu
T_1	Teplota plynu (montáž)	V_1	Konečný objem plynu

Výroba skel probíhala nedaleko od Brna v Pustiměři, jejíž nadmořská výška je cca 280m. Montáž byla prováděna v Brně mezi ulicemi Pražákova a Heršpická, kde nadmořská výška pro sklo ve výšce 5m u AZ Tower dosahuje 320m. Parametry zvoleny pro výrobu i montáž spravuje příslušná norma.

Parametry klimatického zatížení - léto

☒ Aktivovat

Výroba		Montáž		Rozdíl
Teplota:	19.0 [°C]	Teplota	Vnější: 28.0 [°C]	9.0 [°C]
			Plyn: 39.0 [°C]	20.0 [°C]
			Vnitřní: 28.0 [°C]	9.0 [°C]
Atmosférický tlak:	0.103 [N/mm ²]	Atmosférický tlak:	0.101 [N/mm ²]	-0.002 [N/mm ²]
Nadmořská výška:	280.0 [m]	Nadmořská výška:	320.0 [m]	40.0 [m]

Parametry klimatického zatížení - zima

☒ Aktivovat

Výroba		Montáž		Rozdíl
Teplota:	27.0 [°C]	Teplota	Vnější: -10.0 [°C]	-37.0 [°C]
			Plyn: 2.0 [°C]	-25.0 [°C]
			Vnitřní: 19.0 [°C]	-8.0 [°C]
Atmosférický tlak:	0.099 [N/mm ²]	Atmosférický tlak:	0.103 [N/mm ²]	0.004 [N/mm ²]
Nadmořská výška:	280.0 [m]	Nadmořská výška:	320.0 [m]	40.0 [m]

Objem se vypočítá automaticky z daných rozměrů. Objem v odstavci F je V_0 . Pro dvojsklo

Plocha č.	A Označení materiálu	B Tloušťka t [mm]	C Počet vrstev	D Plocha [m ²]	E Povrch [m ²]	F Objem [m ³]	G Hmotnost [t]
1	Tepelně tvrzené plavené sklo	8.00	1	5.000	5.000	0.040	0.100
	Suchý vzduch	12.00	1	5.000	0.000	0.060	0.000
	Tepelně tvrzené plavené sklo	12.00	1	5.000	5.000	0.060	0.150
Σ		32.00	3	5.000	10.000	0.160	0.250
Σ Celkem				5.000	10.000	0.160	0.250

Pro trojsklo

Σ Celkem				5.000	10.000	0.280	0.400
----------	--	--	--	-------	--------	-------	-------

Parametry klimatického zatížení jsou rozděleny na letní a zimní. Na levé straně jsou uvedeny podmínky, při kterých bylo sklo vyrobeno, uprostřed, při jakých podmínkách byla namontována a vpravo se pak automaticky zobrazí rozdíly mezi podmínkami montáže a výroby. Jelikož může být teplota po montáži pro jednotlivé složky odlišná, musíme zadat teplotu vnější, vnitřní a teplotu plynu. Následně je pak klimatické zatížení, automaticky pomocí modulu RF-GLASS, přičteno k vybraným zatěžovacím stavům nebo skupinám ZS (zvlášť letní a zvlášť zimní).

Existující zatěžovací stavy	
Q_w ZS1	Vítr
G ZS2	Klimatické zatížení - Zima - Teplota
G ZS3	Klimatické zatížení - Zima - Atmosférický tlak
G ZS4	Klimatické zatížení - Zima - Nadmořská výška

Existující zatěžovací stavy	
Q_w ZS1	Vítr
G ZS2	Klimatické zatížení - Léto - Teplota
G ZS3	Klimatické zatížení - Léto - Atmosférický tlak
G ZS4	Klimatické zatížení - Léto - Nadmořská výška

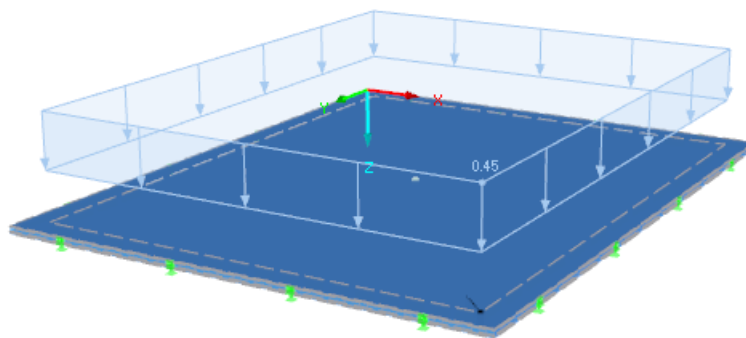
ZATĚŽOVACÍ STAVY PRO 5m – LÉTO

Zatížení pro dvojskla

Zatížené jsou plochy ohraničující plynná tělesa. Spodní plocha plynného tělesa je zatížena zatížením ve směru $+z(\downarrow)$, horní plocha ve směru $-z(\uparrow)$. Styl zatížení pro trojskla je ukázán na str. 91

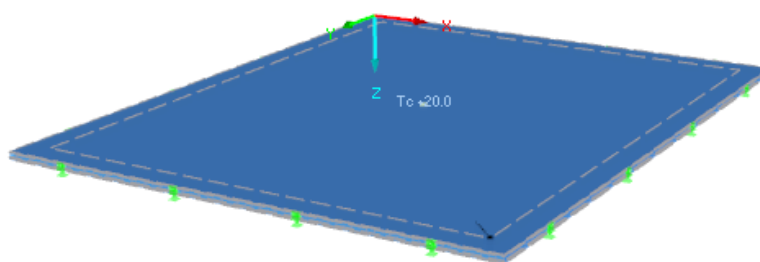
ZS1 - VÍTR

$$w_e = 0,45 \text{ kN/m}^2$$



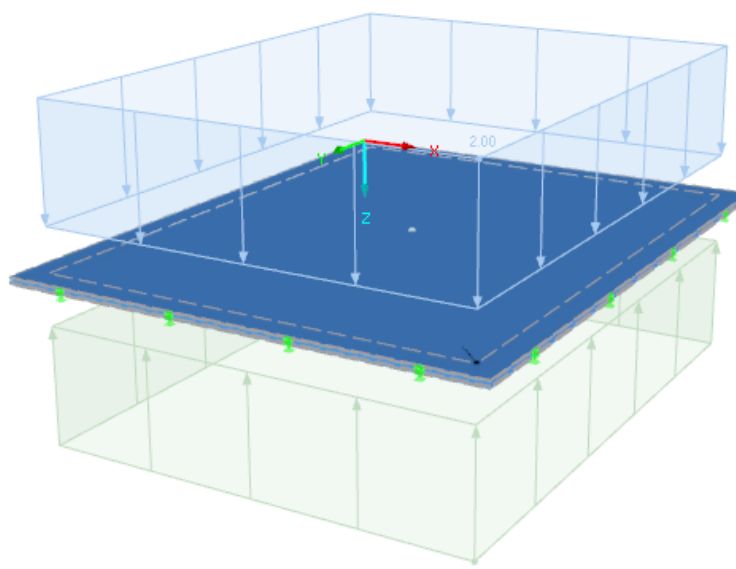
ZS2 - TEPLOTA

$$T_c = 20,0^\circ\text{C}$$



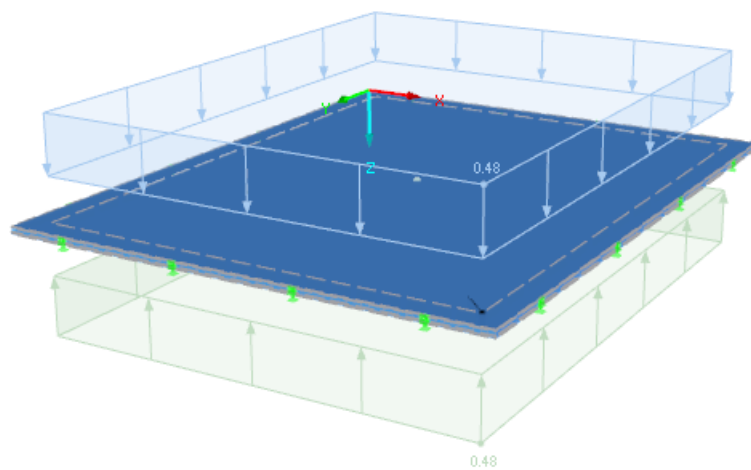
ZS3 - ATMOSFERICKÝ TLAK

$$\Delta p = \pm 2 \text{ kN/m}^2$$



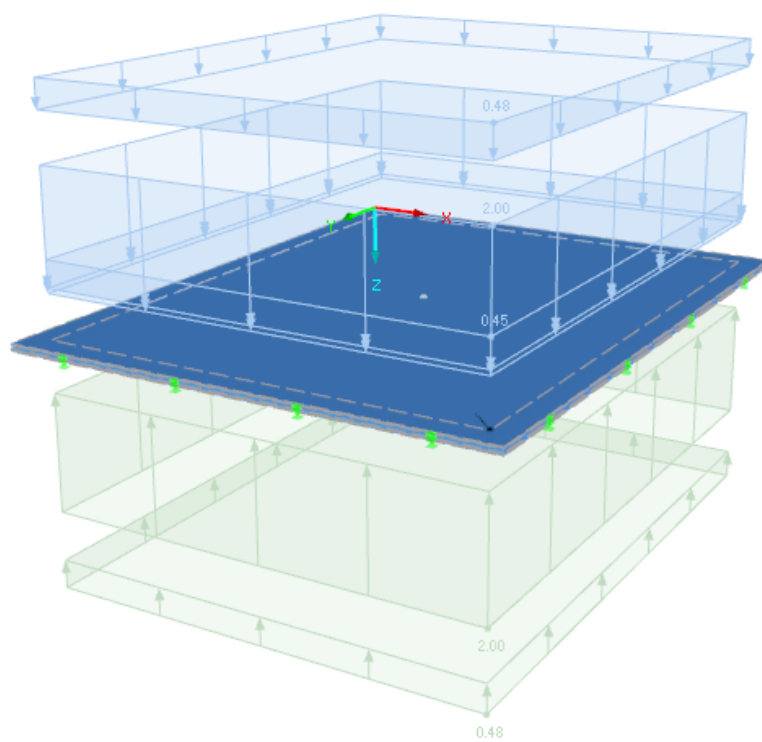
ZS4 - NADMOŘSKÁ VÝŠKA

$$\Delta H = \pm 0,48 \text{ kN/m}^2$$



KOMBINACE ZATÍŽENÍ

$$KZ1 = ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4$$

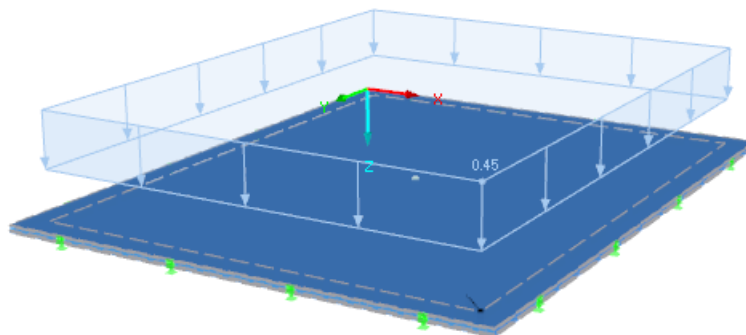


ZATĚŽOVACÍ STAVY PRO 5m – ZIMA

Zatížení pro dvojskla

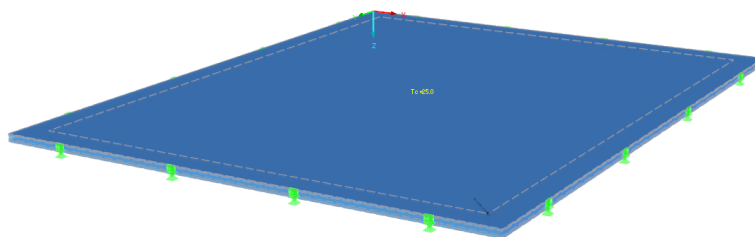
ZS1 - VÍTR

$$w_e = 0,45 \text{ kN/m}^2$$



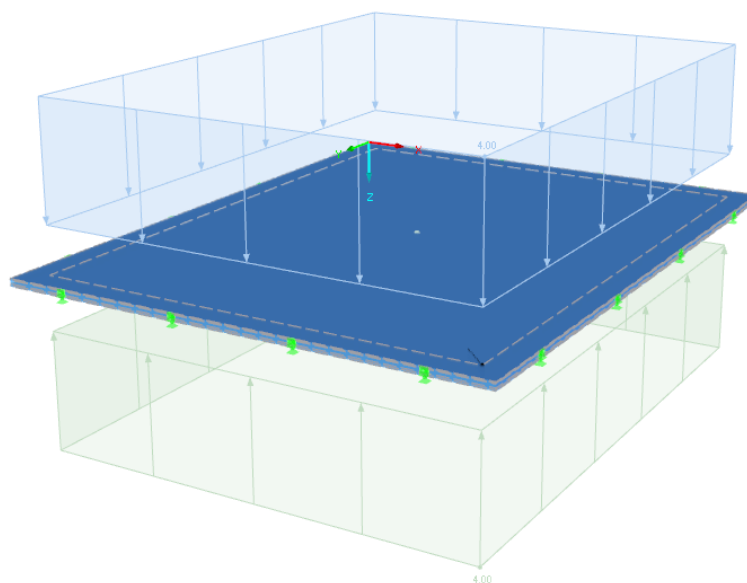
ZS2 - TEPLOTA

$$T_c = -25,0^\circ\text{C}$$



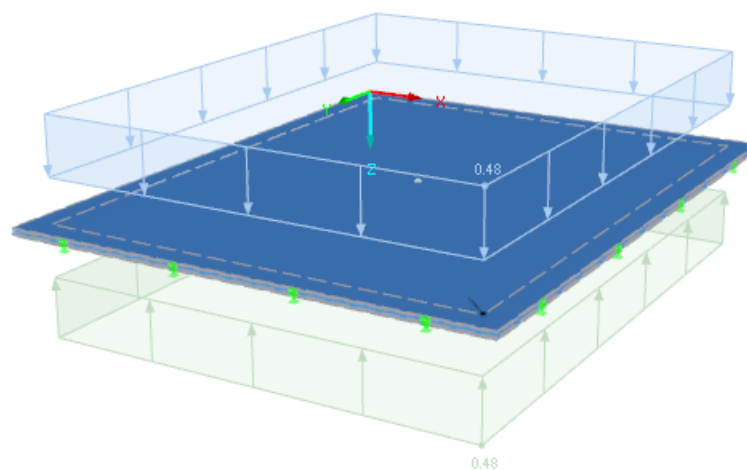
ZS3 - ATMOSFERICKÝ TLAK

$$\Delta p = \pm 4 \text{ kN/m}^2$$



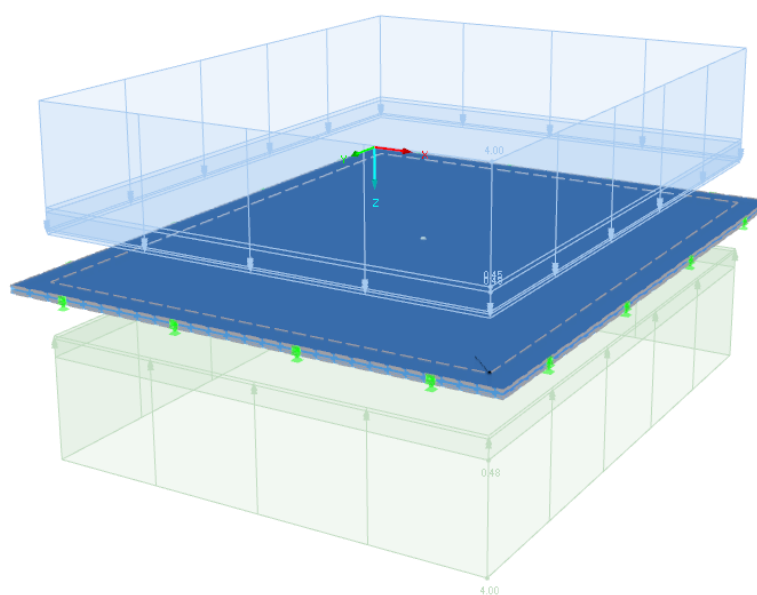
ZS4 - NADMOŘSKÁ VÝŠKA

$$\Delta H = \pm 0,48 \text{ kN/m}^2$$

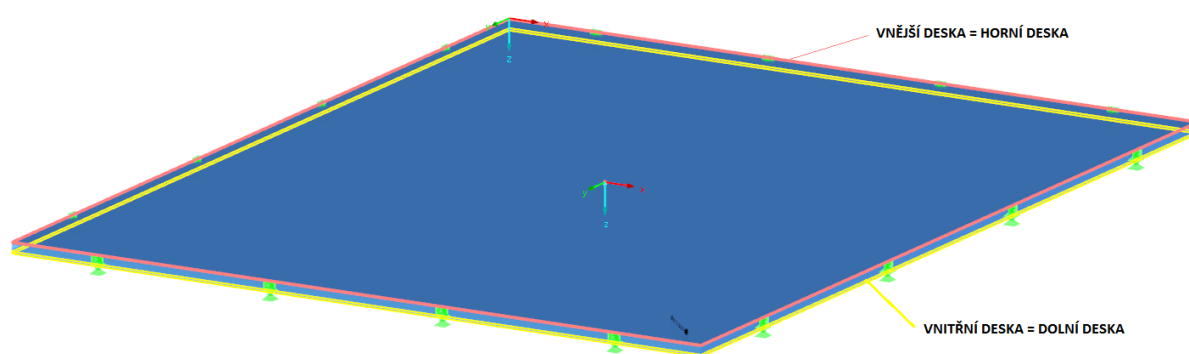


KOMBINACE ZATÍŽENÍ

$$KZ1 = ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4$$

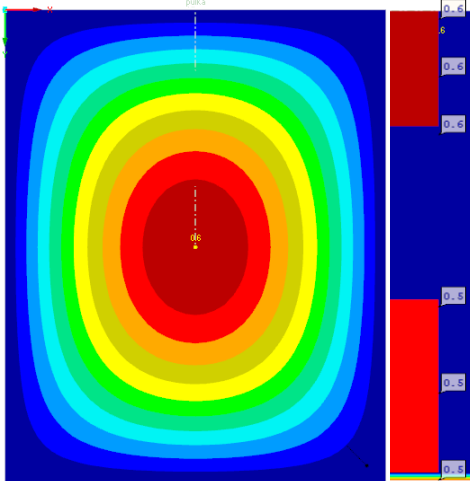
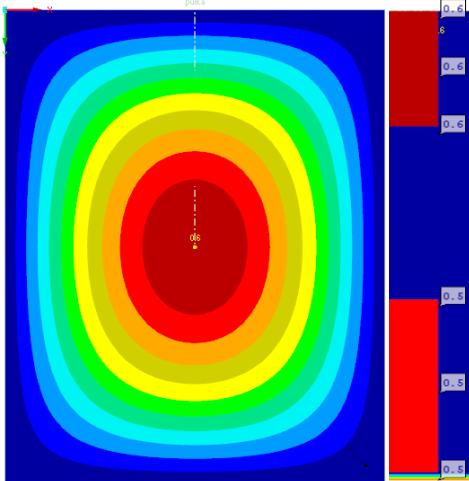
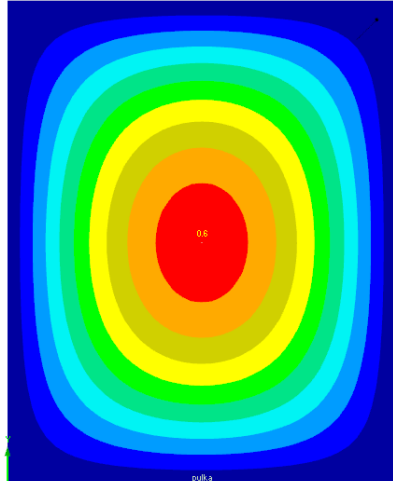
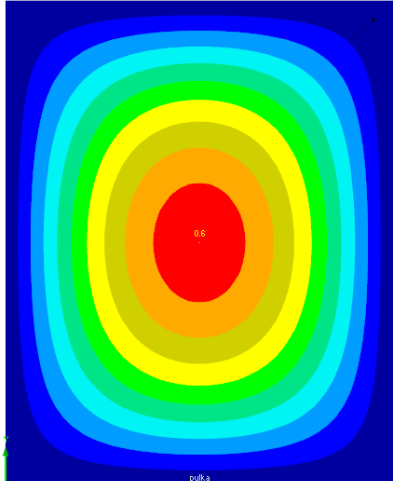
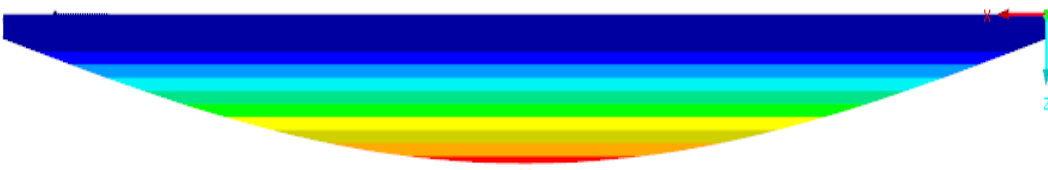


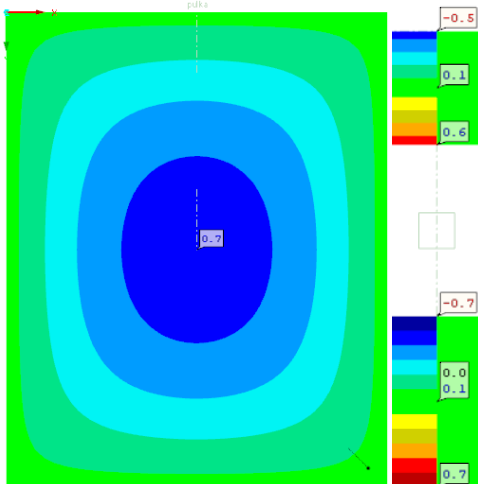
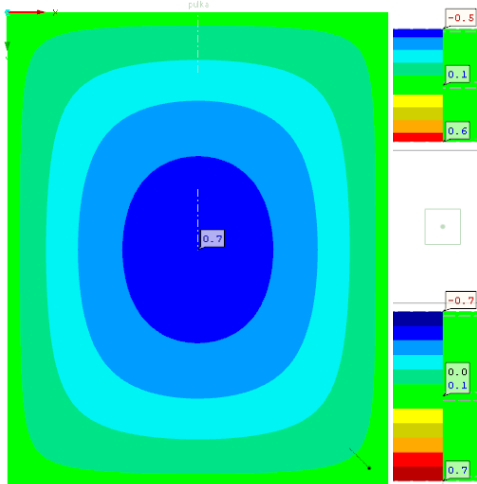
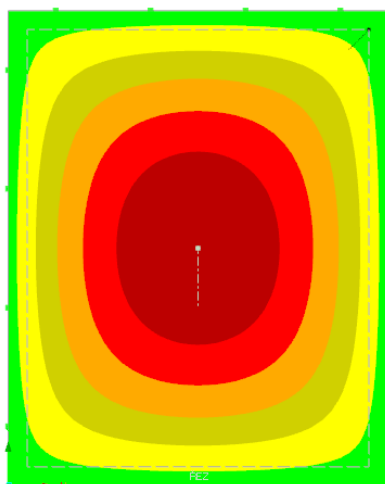
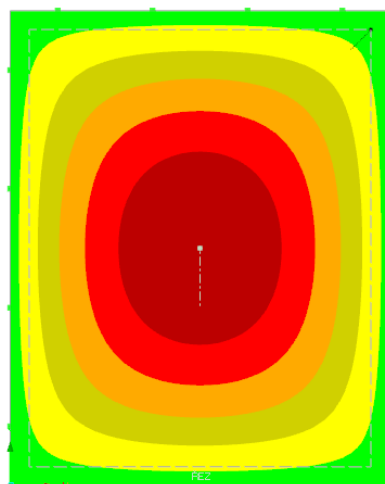
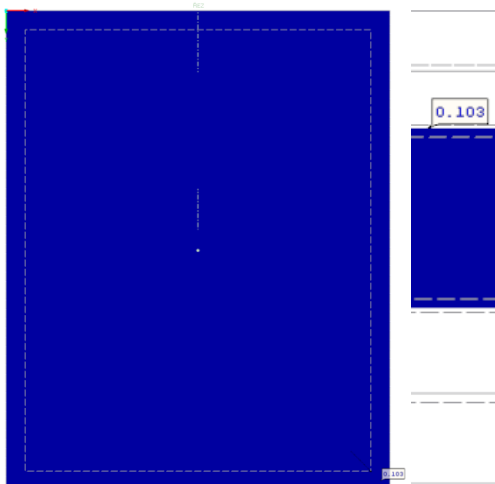
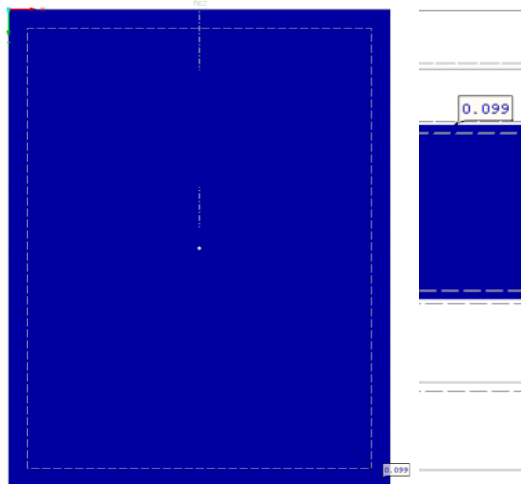
Pro následující obrázky platí fakta z Obr. 56

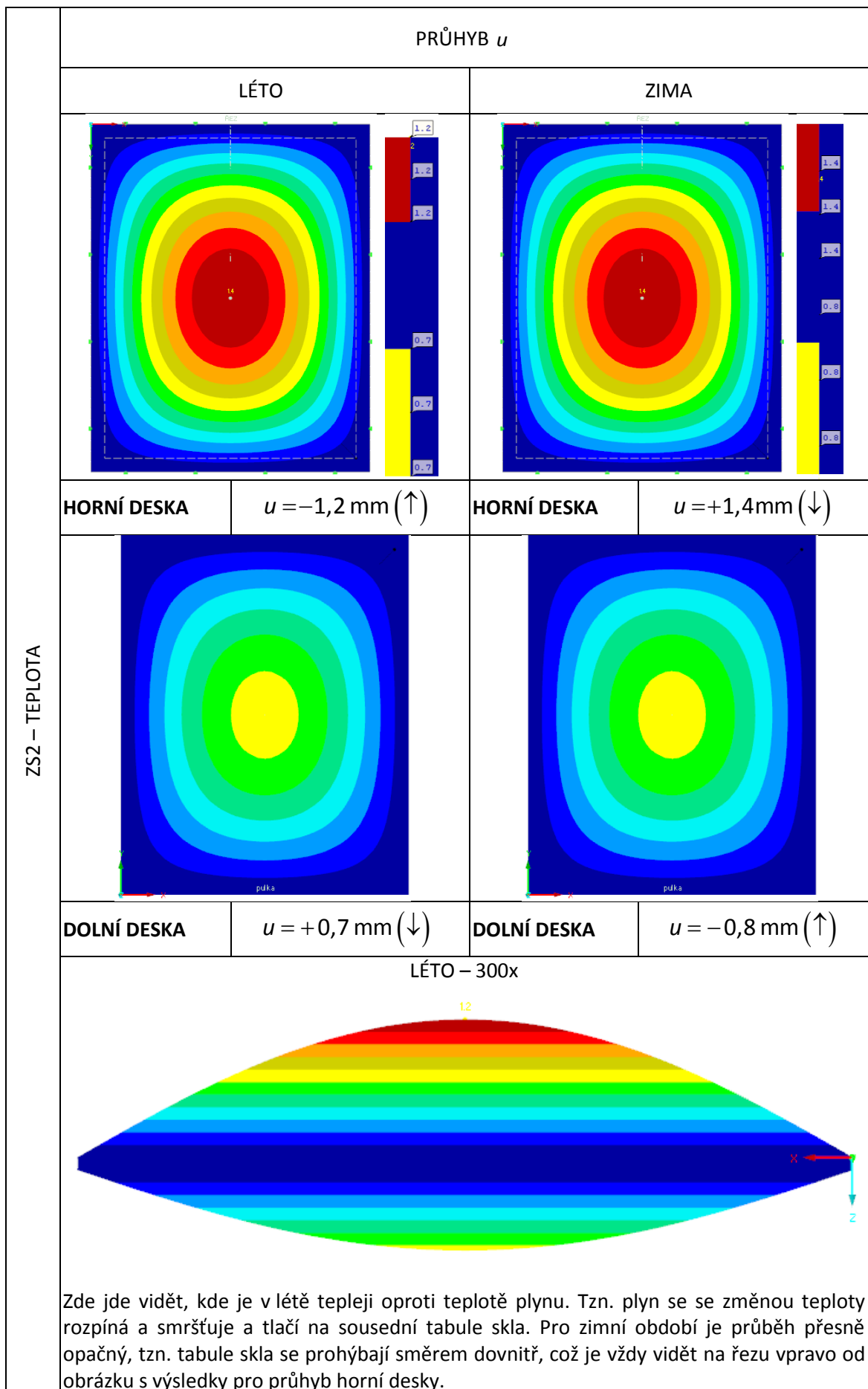


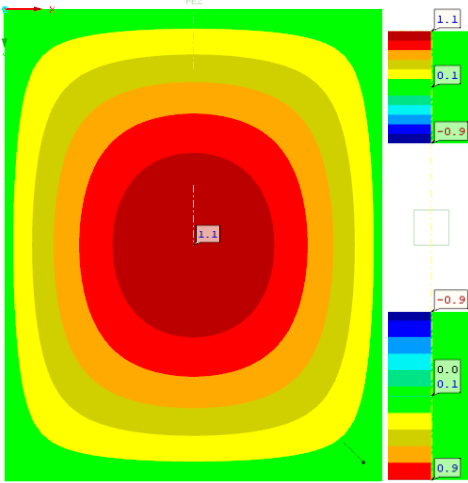
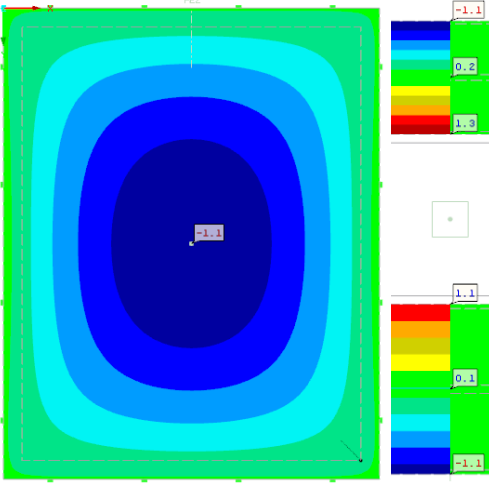
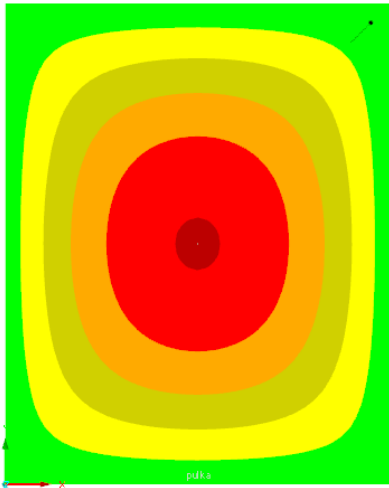
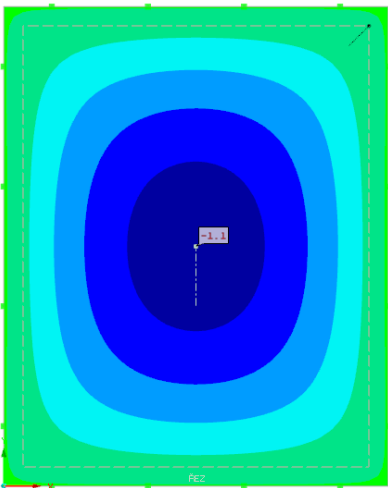
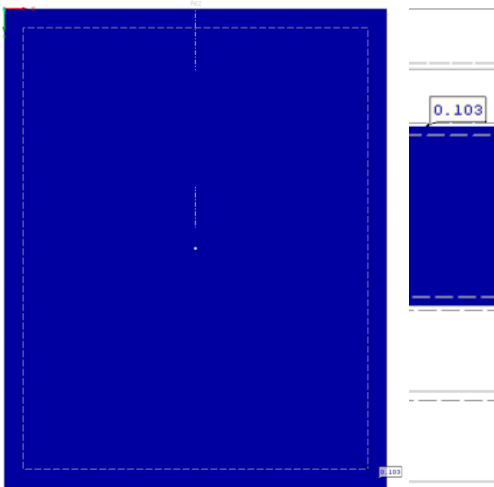
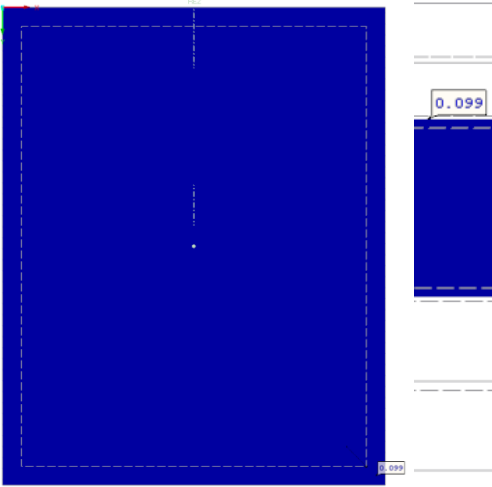
Obr. 56

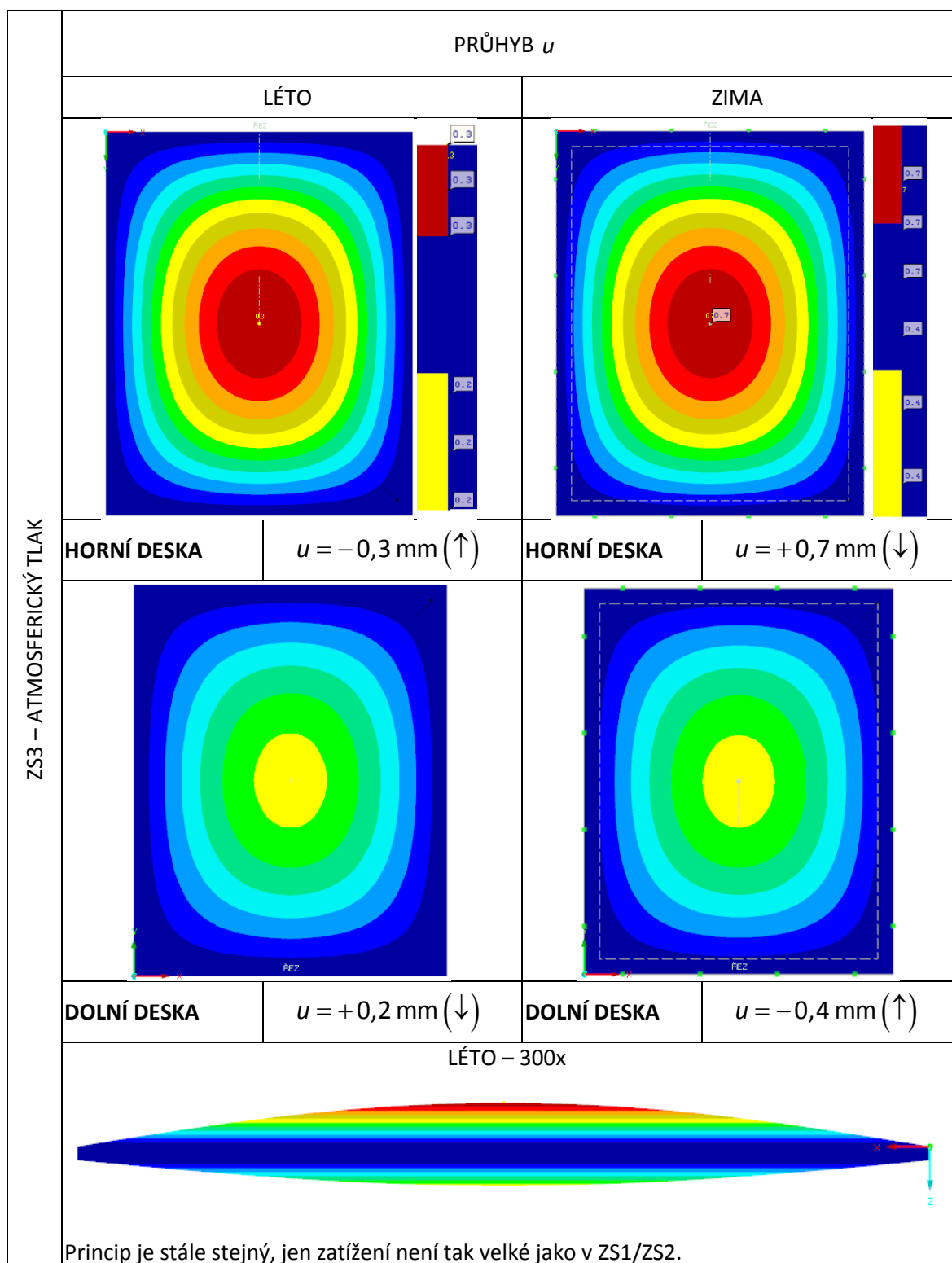
4.1.8 TABULKA VÝSLEDKŮ PRO DVOJSKLO 5M

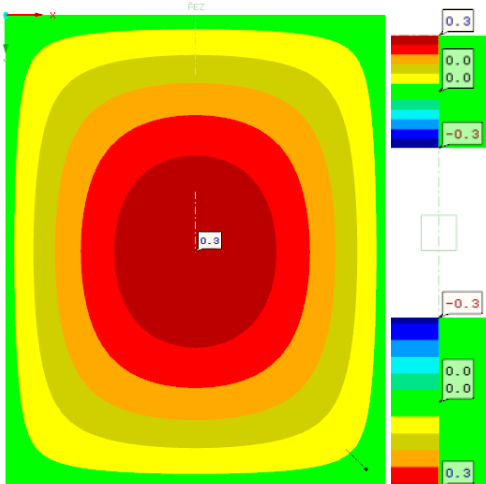
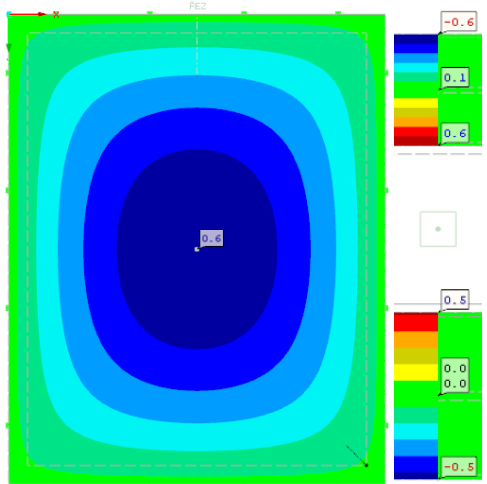
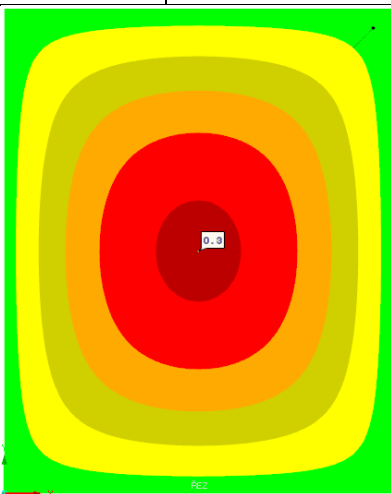
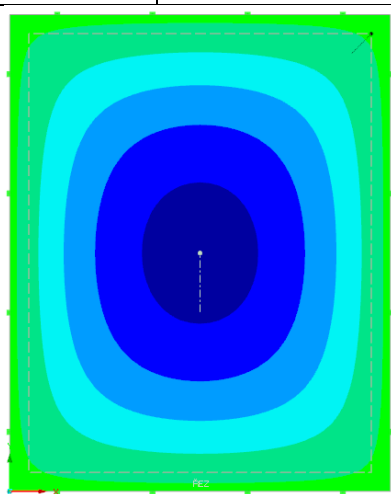
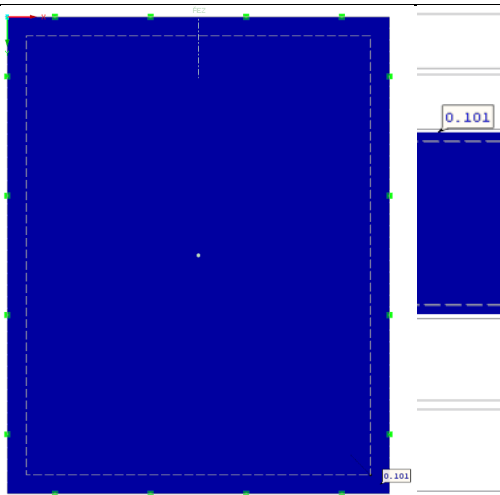
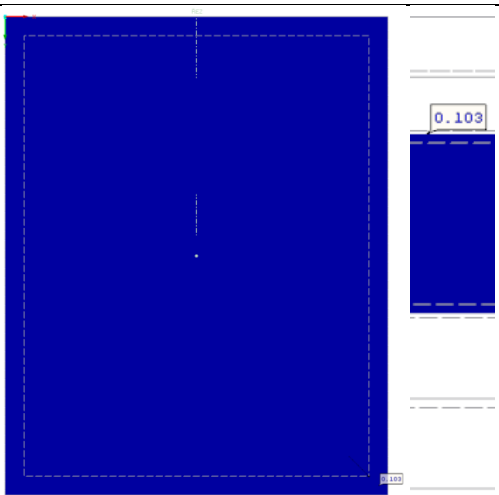
ZS1 - VÍTR	PRŮHYB u			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$u = +0,6 \text{ mm} (\downarrow)$	HORNÍ DESKA	$u = +0,6 \text{ mm} (\downarrow)$
				
	DOLNÍ DESKA	$u = +0,5 \text{ mm} (\downarrow)$	DOLNÍ DESKA	$u = +0,5 \text{ mm} (\downarrow)$
LÉTO I ZIMA – 300x				
				
Posuny jsou totožné, jelikož velikost zatížení od větru je stejná. Na řezu vpravo můžeme vidět, jak se průhyb horní desky přes vzduchovou komoru zmírní o cca 80%.				

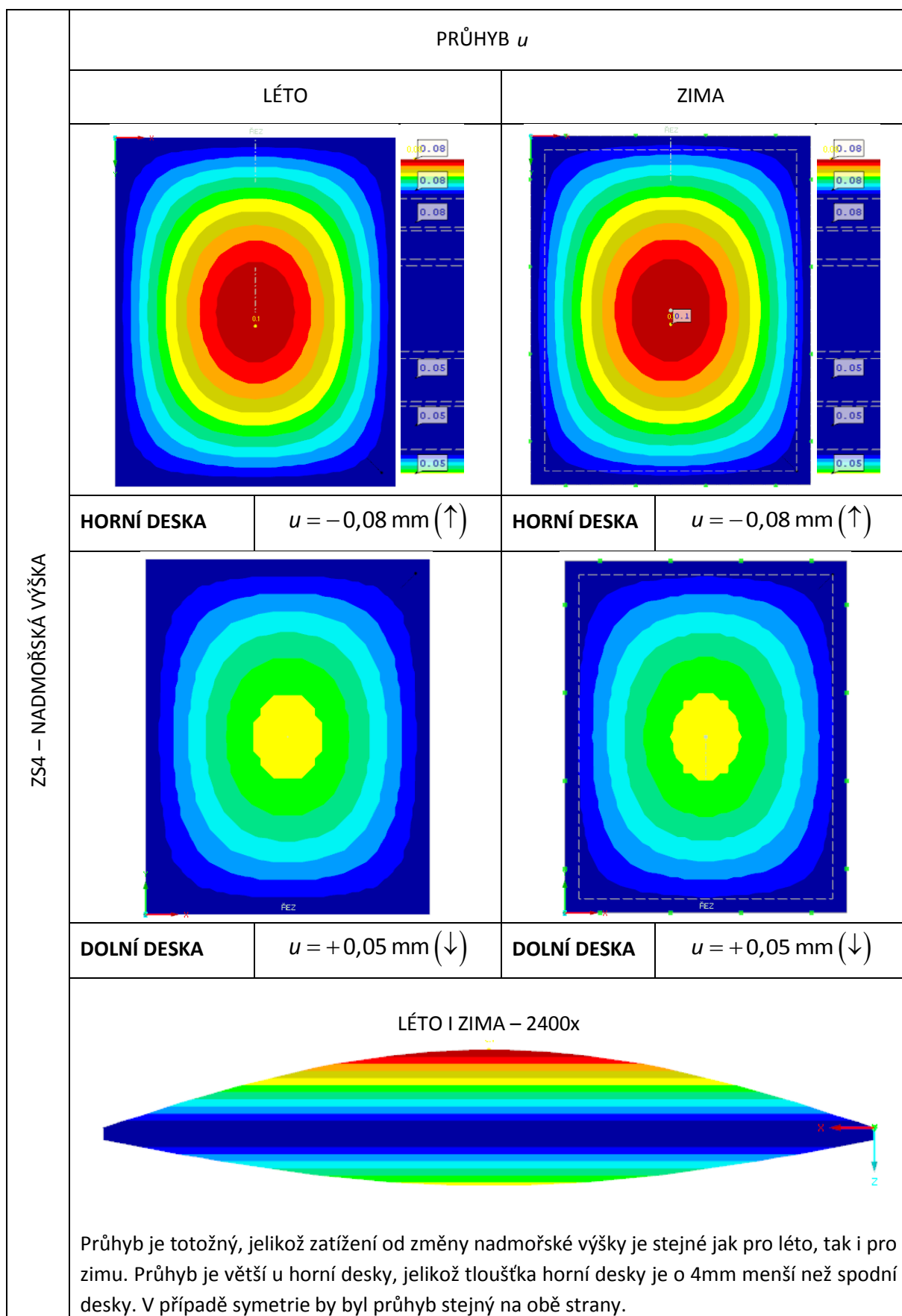
ZS1 - VÍTR		NAPĚTÍ σ_x			
		LÉTO		ZIMA	
					
		HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,5 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,5 \text{ MPa}$
					
		DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,7 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,7 \text{ MPa}$
ZS1 - VÍTR		TLAK PLYNU p_p			
		LÉTO		ZIMA	
					
		$p_p = 0,103 \text{ MPa}$		$p_p = 0,099 \text{ MPa}$	
Jiné hodnoty tlaku plynu jsou způsobeny jiným hodnotami tlaku při výrobě v létě a v zimě					

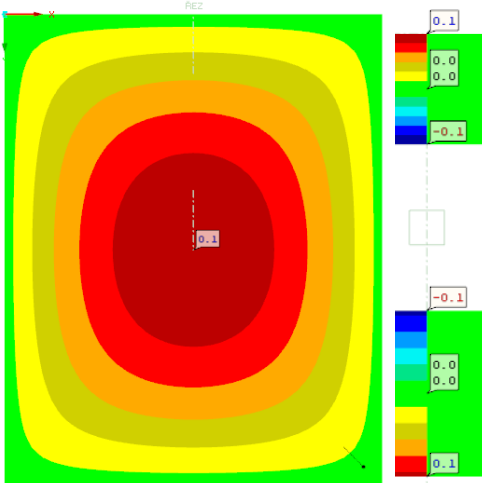
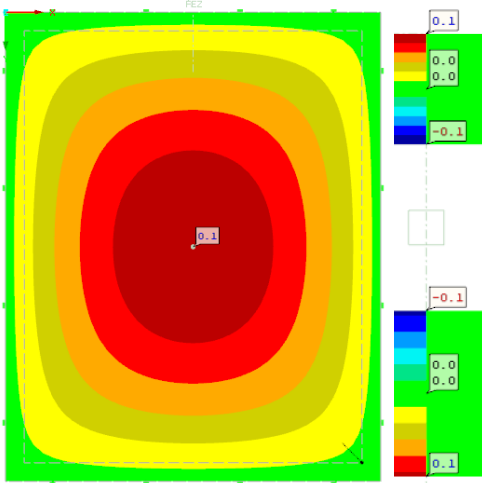
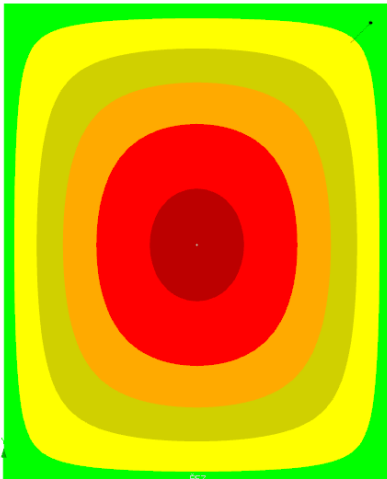
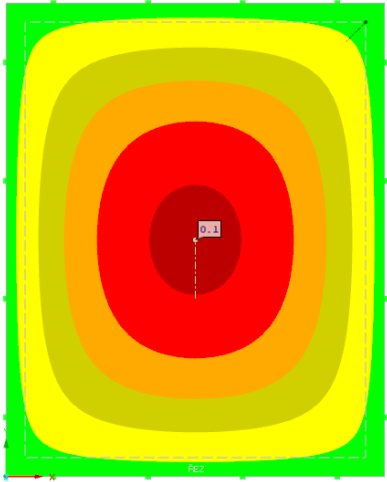
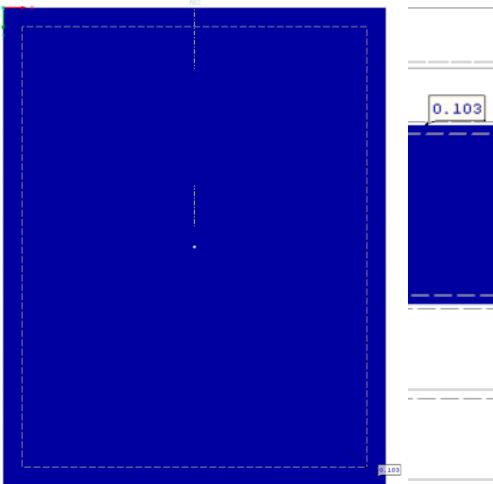
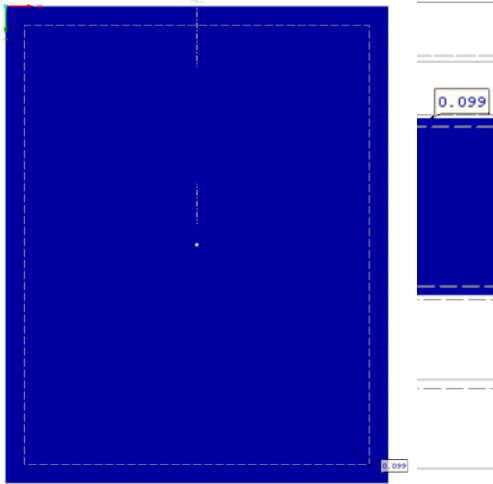


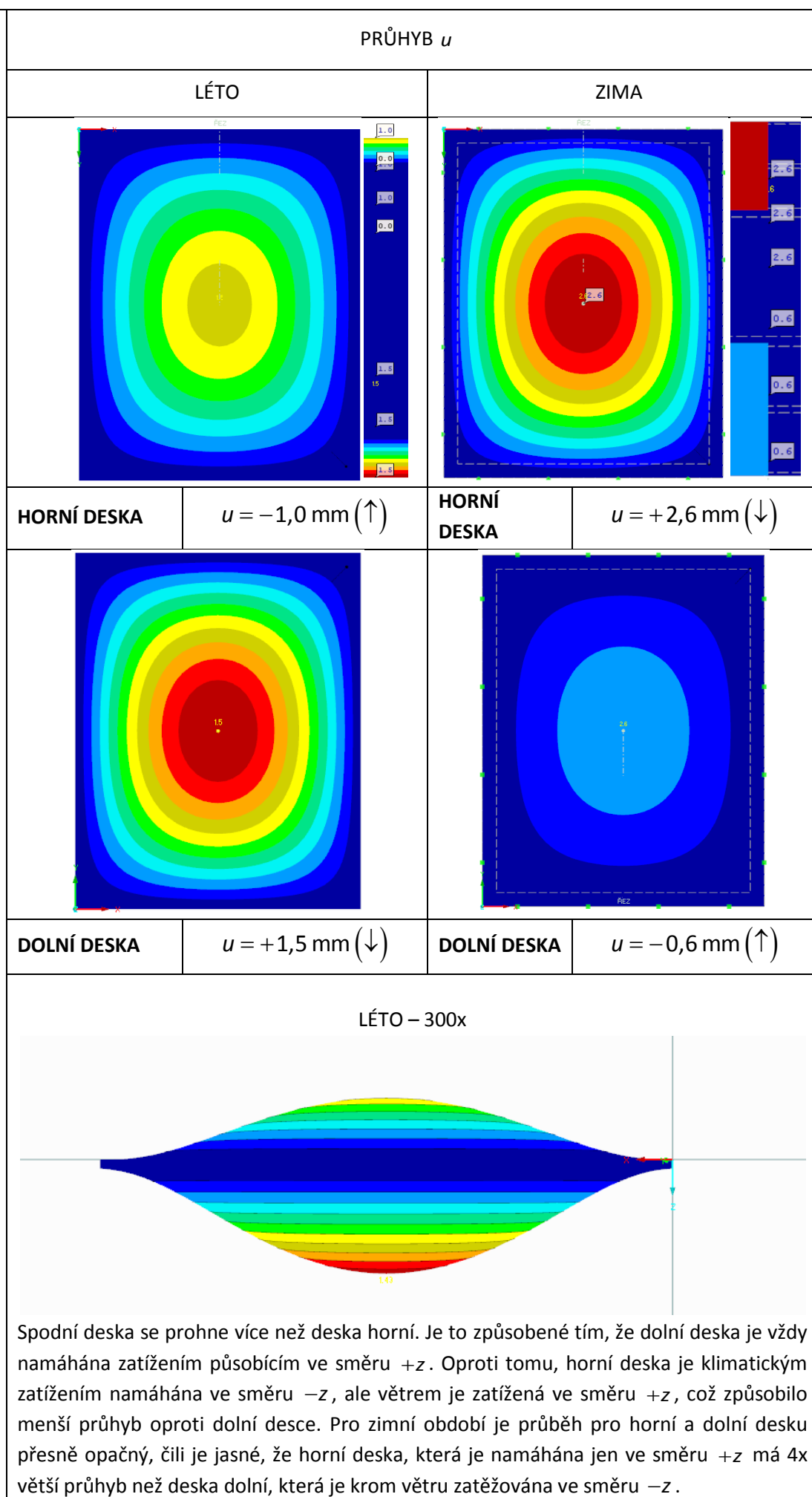
ZS2 – TEPLOTA	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 1,1 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,1 \text{ MPa}$
				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,9 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,1 \text{ MPa}$
ZS2 – TEPLOTA	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,103 \text{ MPa}$		$p_p = 0,099 \text{ MPa}$	

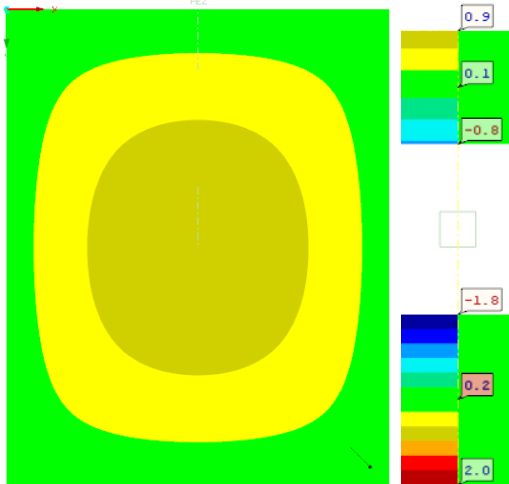
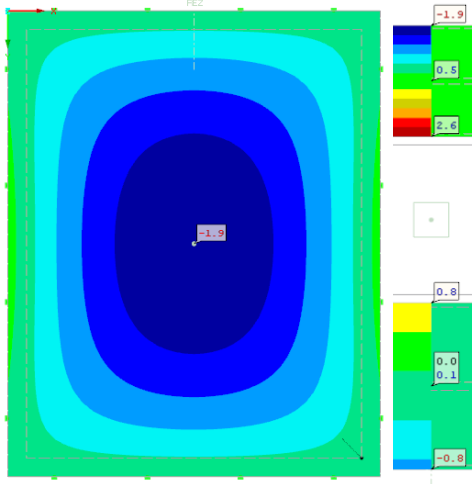
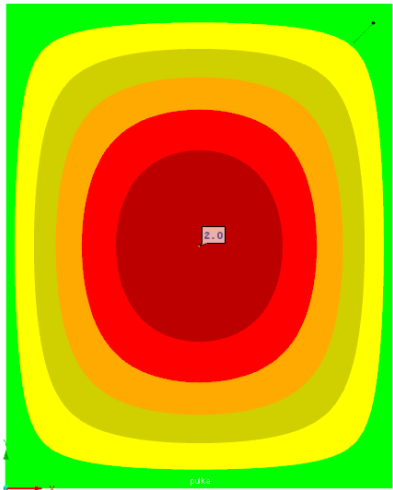
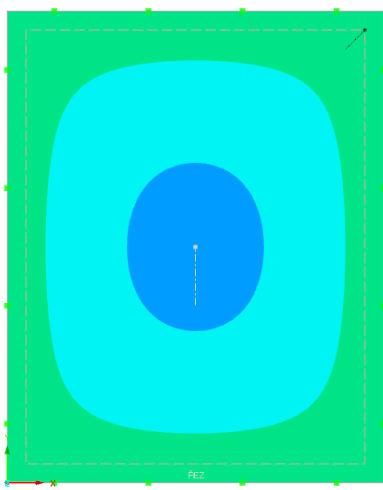
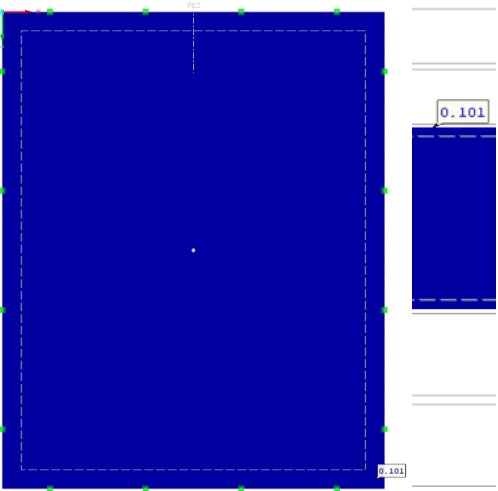
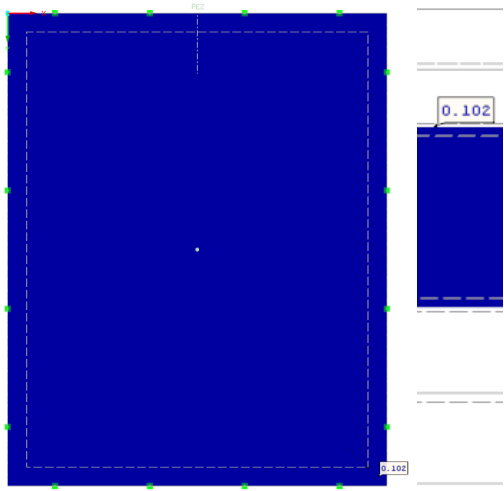


ZS3 – ATMOSFERICKÝ TLAK	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,3 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,6 \text{ MPa}$
				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,3 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,5 \text{ MPa}$
ZS3 – ATMOSFERICKÝ TLAK	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,101 \text{ MPa}$		$p_p = 0,103 \text{ MPa}$	
Zde je tlak plynu při montáži. Tlak plynu je v celém svém objemu konstantní				

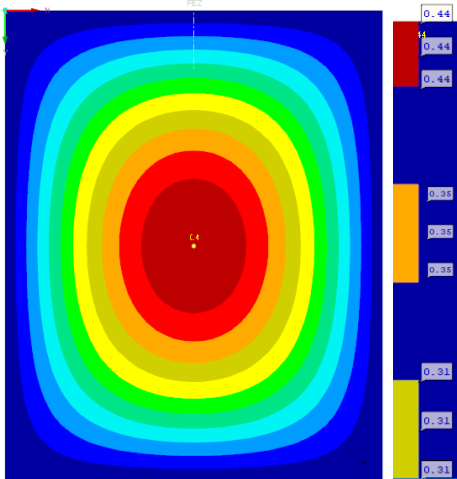
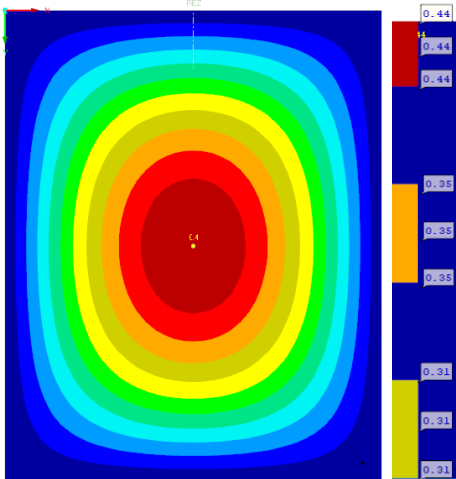
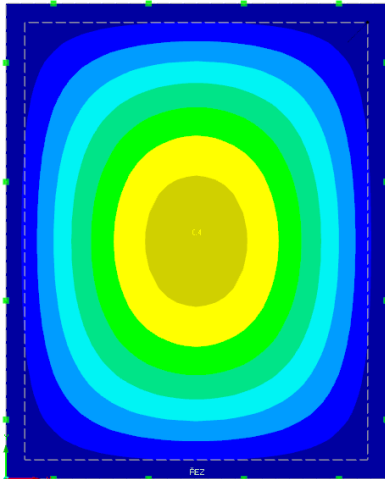
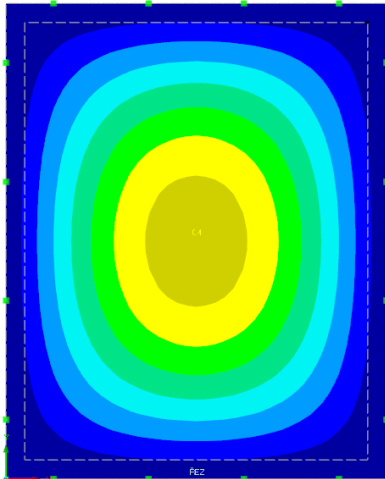
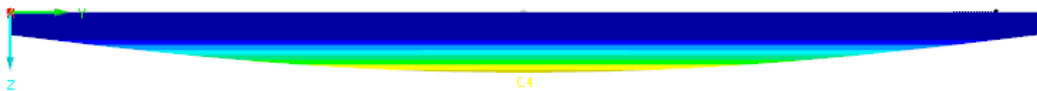


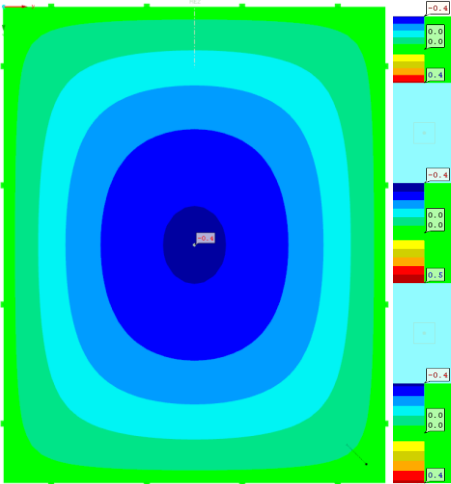
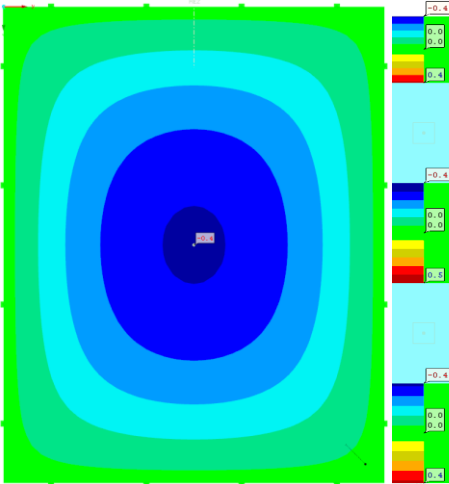
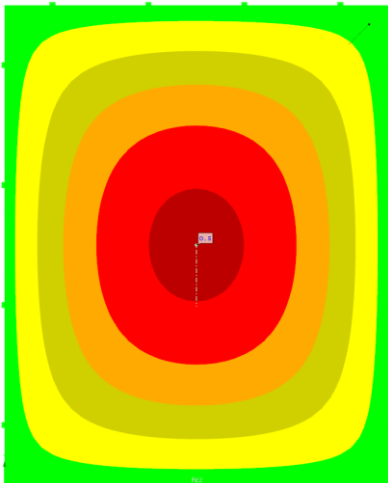
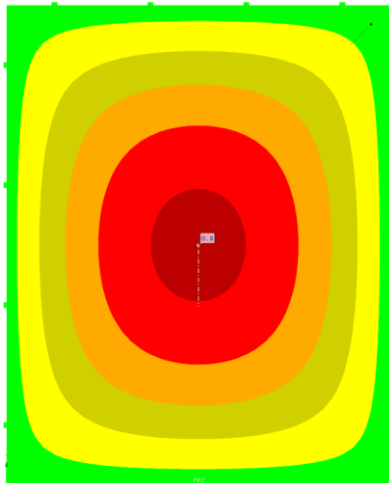
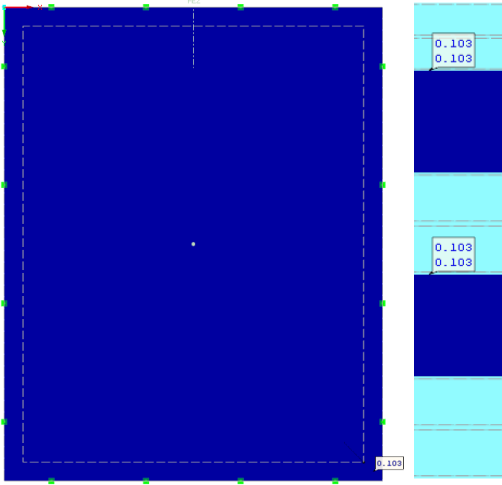
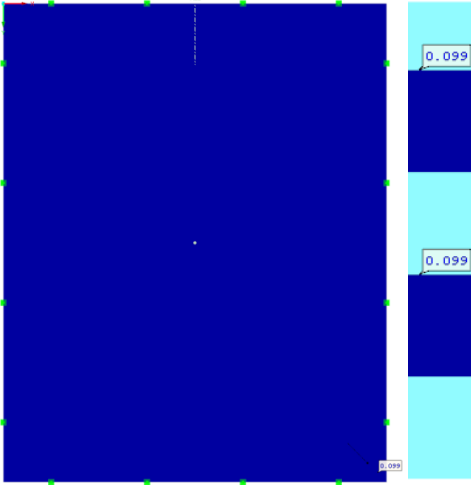
ZS4 – NADMOŘSKÁ VÝŠKA	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$
				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$
ZS4 – NADMOŘSKÁ VÝŠKA	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,103 \text{ MPa}$		$p_p = 0,099 \text{ MPa}$	

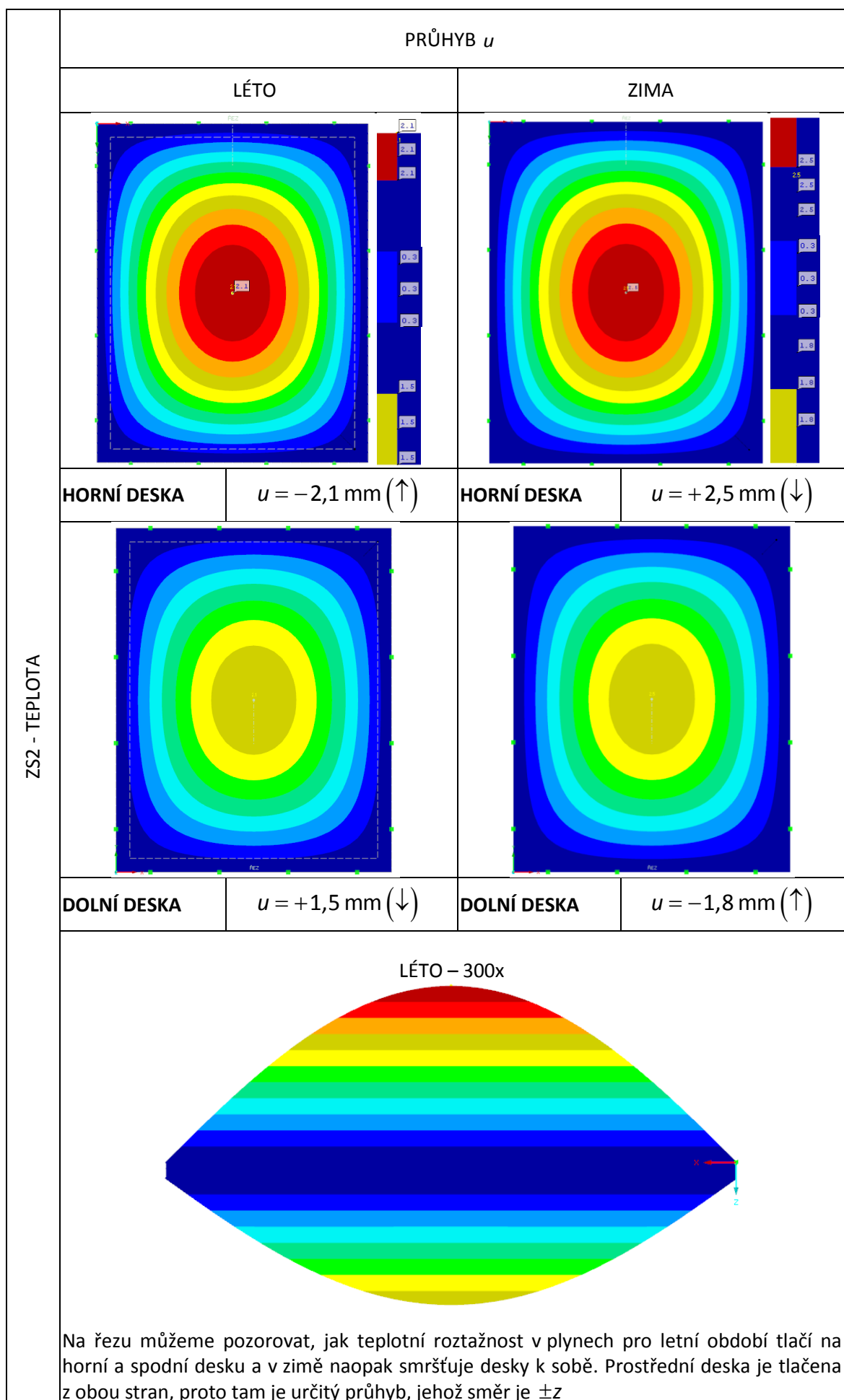


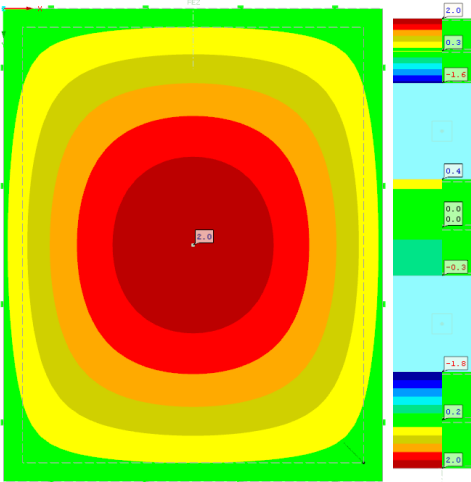
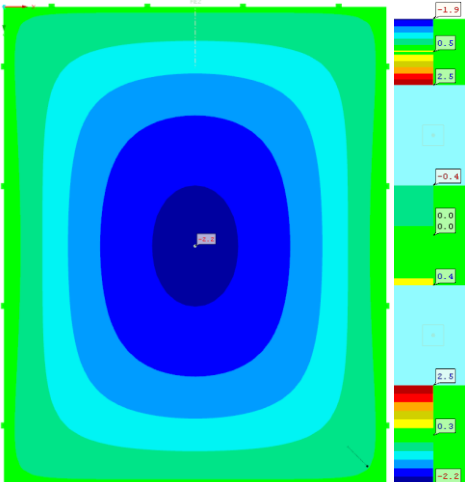
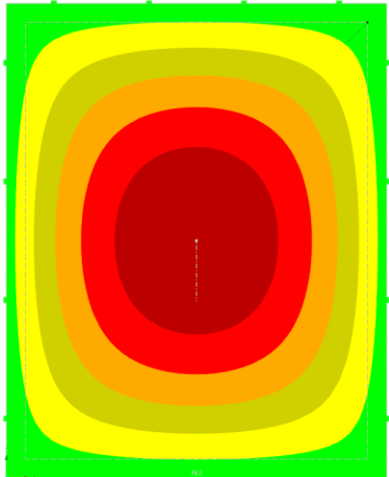
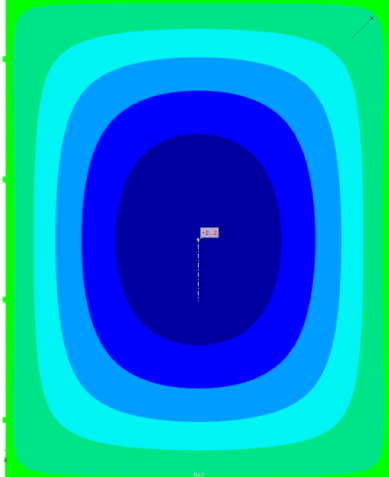
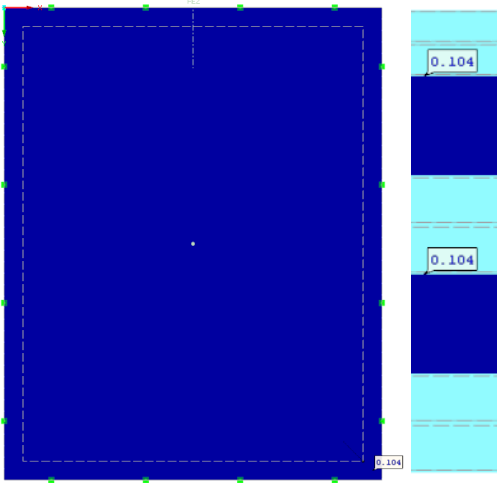
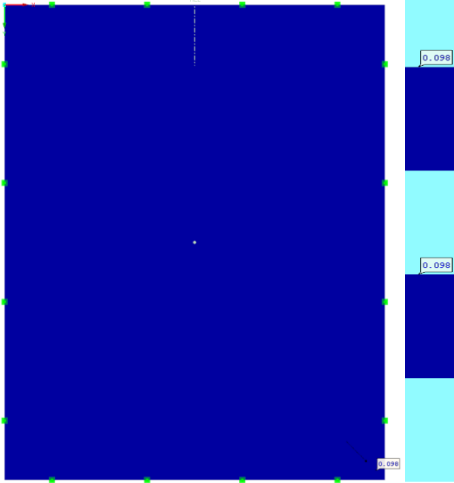
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,9 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,9 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 2,0 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,8 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,101 \text{ MPa}$		$p_p = 0,102 \text{ MPa}$	

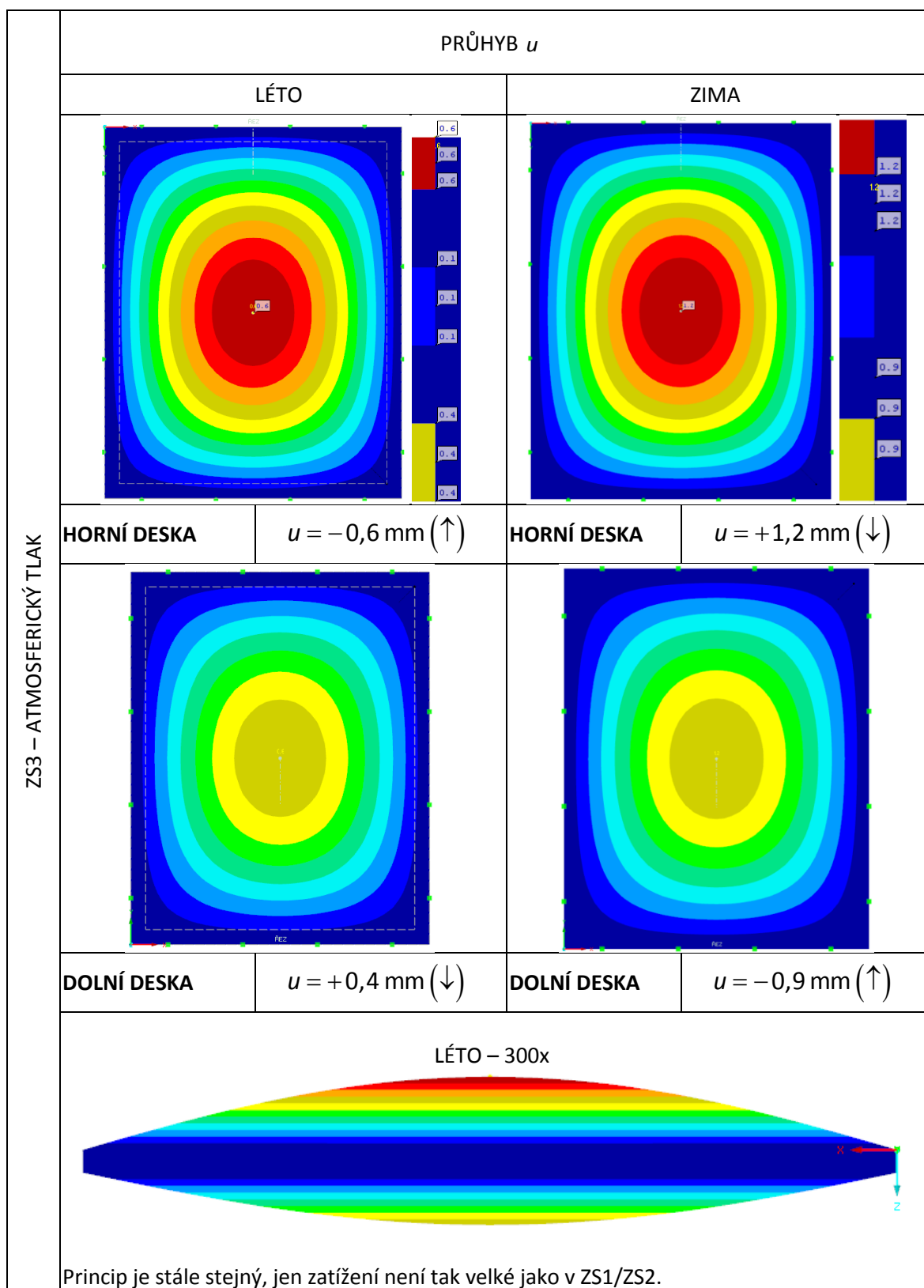
4.1.9 TABULKA VÝSLEDKŮ PRO TROJSKLO V 5M

PRŮHYB u				
LÉTO			ZIMA	
ZS1 - VÍTR				
	HORNÍ DESKA	$u = -0,4 \text{ mm} (\downarrow)$	HORNÍ DESKA	$u = -0,4 \text{ mm} (\downarrow)$
				
	DOLNÍ DESKA	$u = -0,3 \text{ mm} (\downarrow)$	DOLNÍ DESKA	$u = -0,3 \text{ mm} (\downarrow)$
	<p>LÉTO – 300x</p>  <p>Na řezech, které jsou po pravé straně od obrázku s výsledky průhybu pro horní desku, lze vyčíst, jak se zatížení postupně snižuje z horní desky přes střední až na spodní</p>			

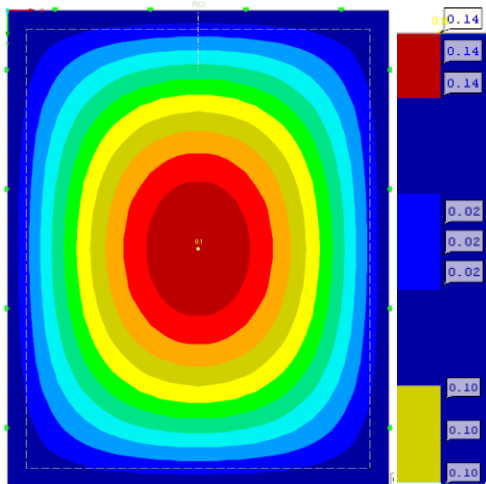
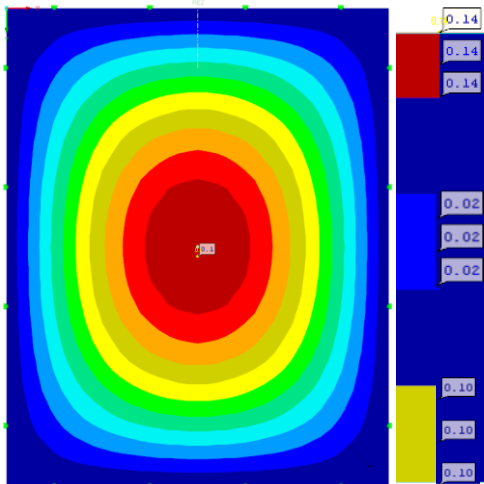
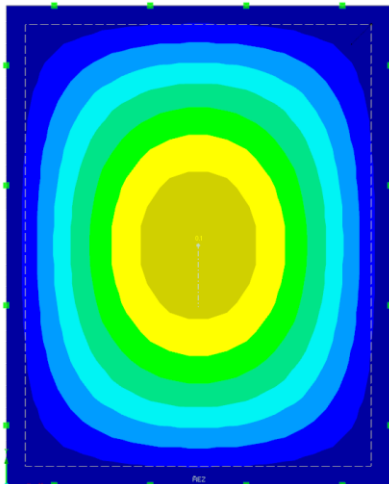
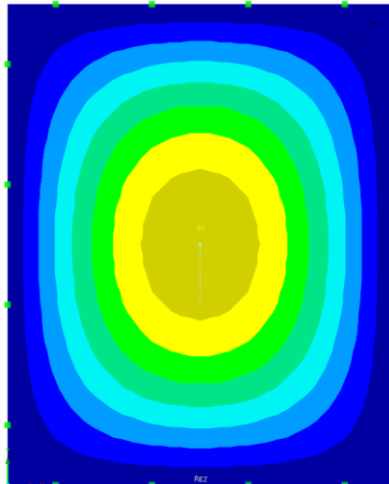
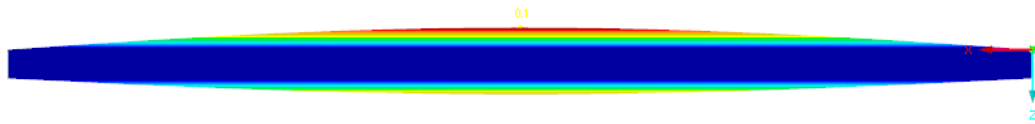
ZS1 - VÍTR		NAPĚTÍ σ_x			
		LÉTO		ZIMA	
					
		HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,4 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,4 \text{ MPa}$
					
		DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,5 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,5 \text{ MPa}$
ZS1 - VÍTR		TLAK PLYNU p_p			
		LÉTO		ZIMA	
					
		$p_p = 0,103 \text{ MPa}$		$p_p = 0,099 \text{ MPa}$	

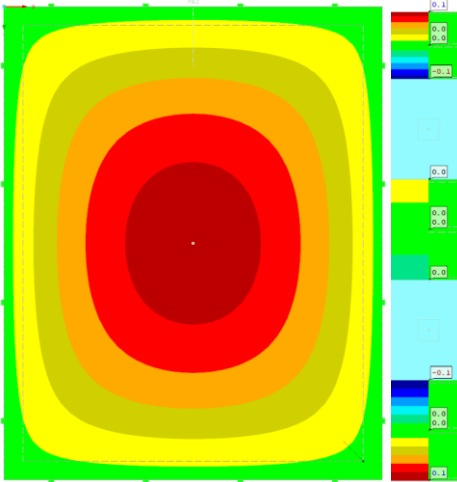
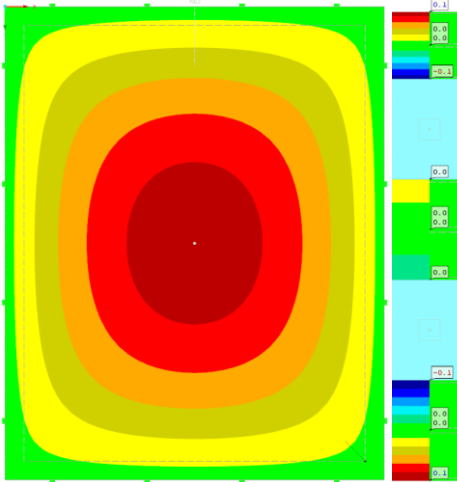
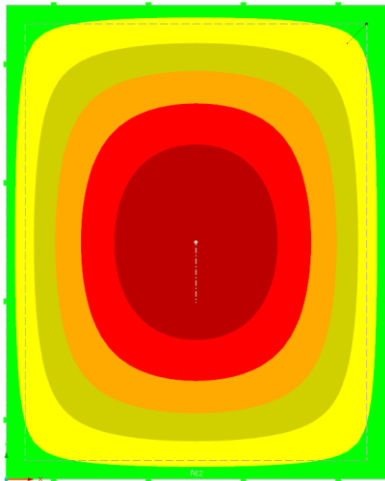
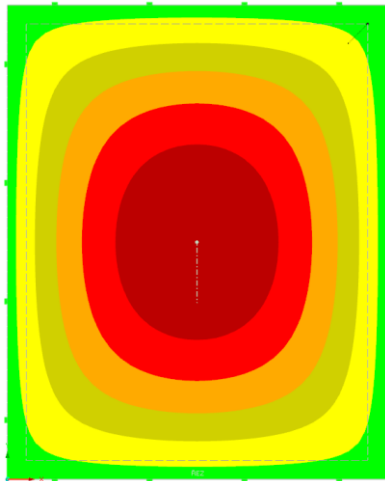
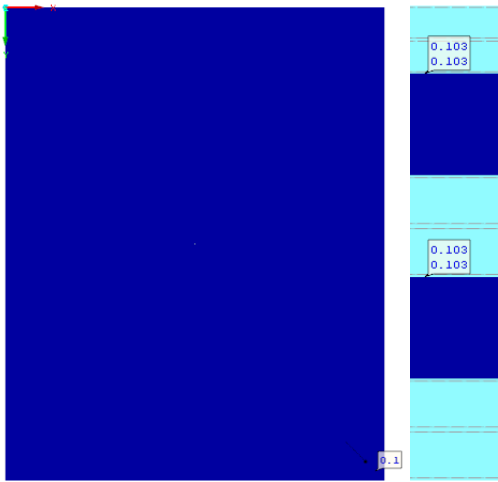
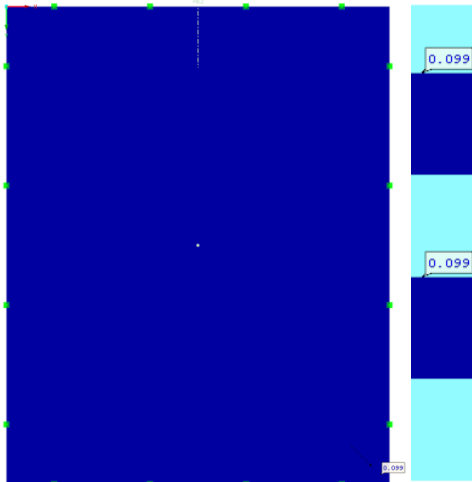


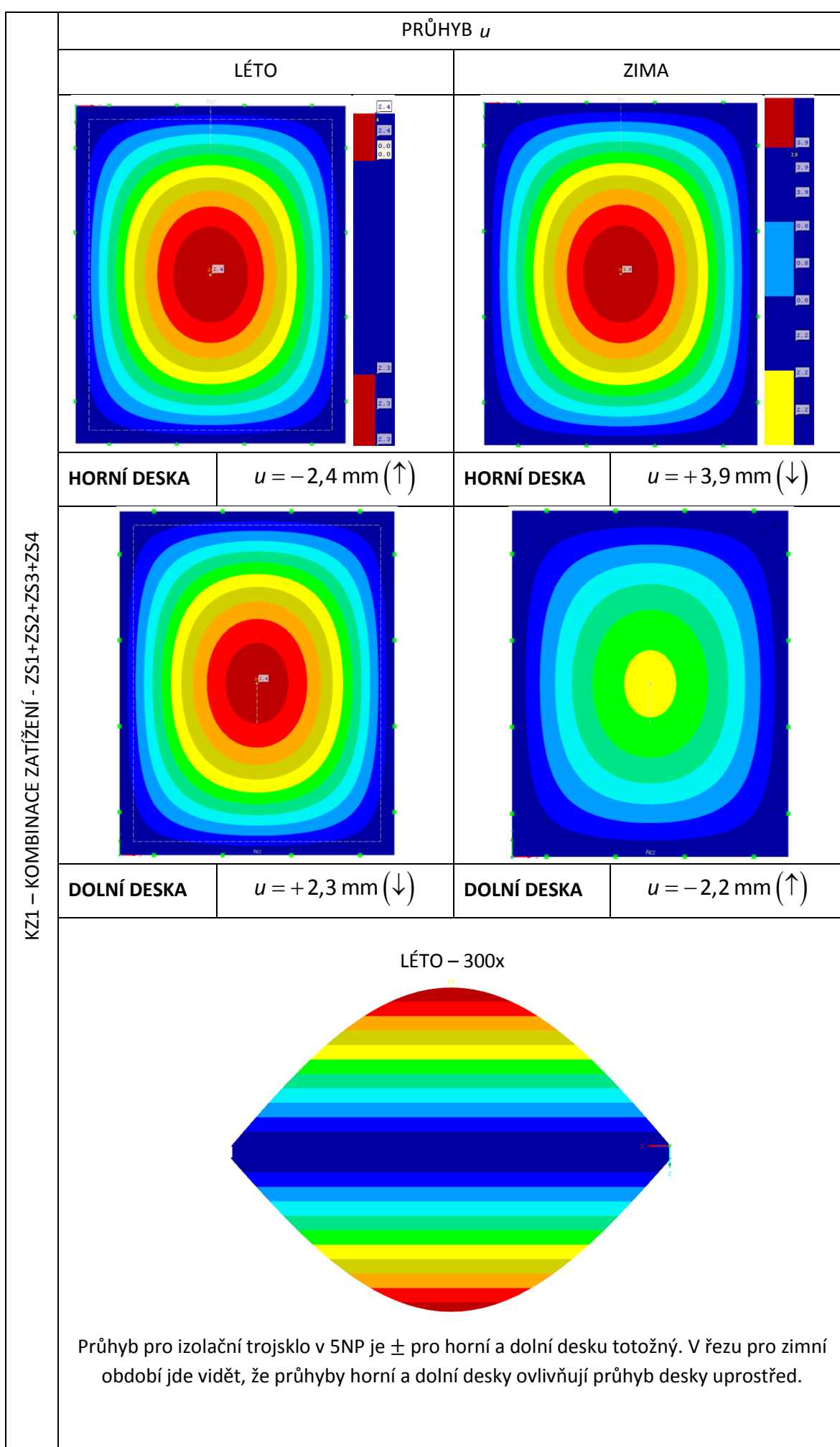
ZS2 - TEPLOTA		NAPĚTÍ σ_x			
		LÉTO		ZIMA	
					
		HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 2,0 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,9 \text{ MPa}$
ZS2 - TEPLOTA					
		DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 2,0 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -2,2 \text{ MPa}$
ZS2 - TEPLOTA		TLAK PLYNU p_p			
		LÉTO		ZIMA	
					
		$p_p = 0,104 \text{ MPa}$		$p_p = 0,098 \text{ MPa}$	



ZS3 – ATMOSFERICKÝ TLAK	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,5 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,9 \text{ MPa}$
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,6 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,1 \text{ MPa}$
ZS3 – ATMOSFERICKÝ TLAK	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
	$p_p = 0,101 \text{ MPa}$		$p_p = 0,103 \text{ MPa}$	

ZS4 – NADMOŘSKÁ VÝŠKA	PRŮHYB u			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$u = -0,14 \text{ mm} (\uparrow)$	HORNÍ DESKA	$u = -0,14 \text{ mm} (\uparrow)$
				
	DOLNÍ DESKA	$u = +0,10 \text{ mm} (\downarrow)$	DOLNÍ DESKA	$u = +0,10 \text{ mm} (\downarrow)$
<div>LÉTO – 300x</div> 				
<p>Zde jsou výsledky totožné, jelikož zatížení od změny nadmořské výšky je stejné jak pro léto, tak i pro zimu. Průhyb je větší u horní desky, jelikož tloušťka horní desky je o 4mm menší než spodní desky. V případě symetrie by byl průhyb stejný na obě strany.</p>				

ZS4 – NADMOŘSKÁ VÝŠKA	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$
				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$
ZS4 – NADMOŘSKÁ VÝŠKA	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,103 \text{ MPa}$		$p_p = 0,099 \text{ MPa}$	

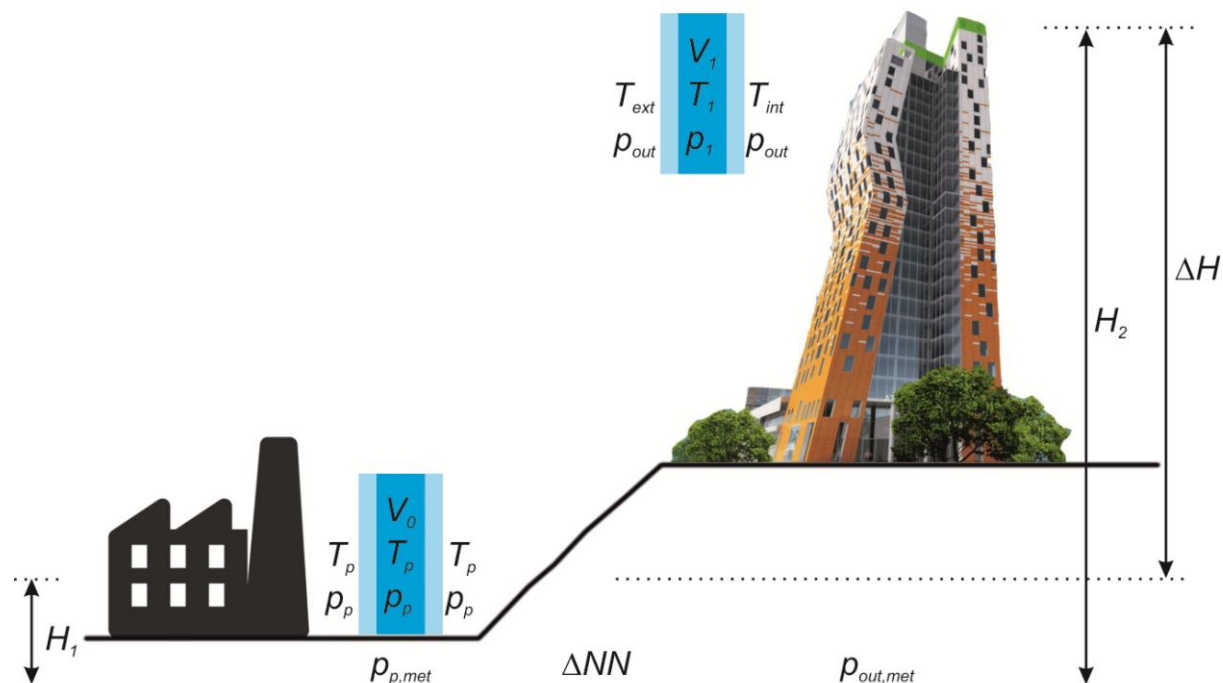


KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4

KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 2,3 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,9 \text{ MPa}$
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 3,3 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -0,8 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
	$p_p = 0,102 \text{ MPa}$		$p_p = 0,102 \text{ MPa}$ - horní komora $p_p = 0,101 \text{ MPa}$ - dolní komora	

4.1.10 PARAMETRY KLIMATICKÉHO ZATÍŽENÍ VE 110M

Ve 110m je postup totožný s postupem, který je popsán v 1.1.4.1.7 parametry klimatického zatížení pro 5m. Níže budou uvedeny pouze ty hodnoty, které jsou odlišné od hodnot z kapitoly 4.1.7 [8]



H_1	Nadmořská výška při výrobě	$p_{\rho,met}$	Atmosférický tlak při hladině moře (výroba)
H_2	Nadmořská výška při montáži	$p_{\rho,out}$	Atmosférický tlak při hladině moře (montáž)
ΔH	Rozdíl nadmořských výšek $H_2 - H_1$	p_ρ	Tlak při výrobě
T_p	Teplota při výrobě	p_{out}	Venkovní tlak v místě montáže
T_{ext}	Teplota na vnější straně skla (montáž)	p_1	Tlak plynu v místě montáže
T_{int}	Teplota na vnitřní straně (montáž)	V_0	Počáteční objem plynu
T_1	Teplota plynu (montáž)	V_1	Konečný objem plynu

Nadmořská výška pro sklo ve výšce 110m u AZ Tower je 404m.

Parametry klimatického zatížení - léto					
<input checked="" type="checkbox"/> Aktivovat					
Výroba		Montáž		Rozdíl	
Teplota:	19.0 [°C]	Teplota	Vnější: 28.0 [°C]		9.0 [°C]
			Plyn: 39.0 [°C]		20.0 [°C]
			Vnitřní: 28.0 [°C]		9.0 [°C]
Atmosférický tlak:	0.103 [N/mm ²]	Atmosférický tlak:	0.101 [N/mm ²]		-0.002 [N/mm ²]
Nadmořská výška:	280.0 [m]	Nadmořská výška:	404.0 [m]		124.0 [m]
Parametry klimatického zatížení - zima					
<input checked="" type="checkbox"/> Aktivovat					
Výroba		Montáž		Rozdíl	
Teplota:	27.0 [°C]	Teplota	Vnější: -10.0 [°C]		-37.0 [°C]
			Plyn: 2.0 [°C]		-25.0 [°C]
			Vnitřní: 19.0 [°C]		-8.0 [°C]
Atmosférický tlak:	0.099 [N/mm ²]	Atmosférický tlak:	0.103 [N/mm ²]		0.004 [N/mm ²]
Nadmořská výška:	280.0 [m]	Nadmořská výška:	404.0 [m]		124.0 [m]

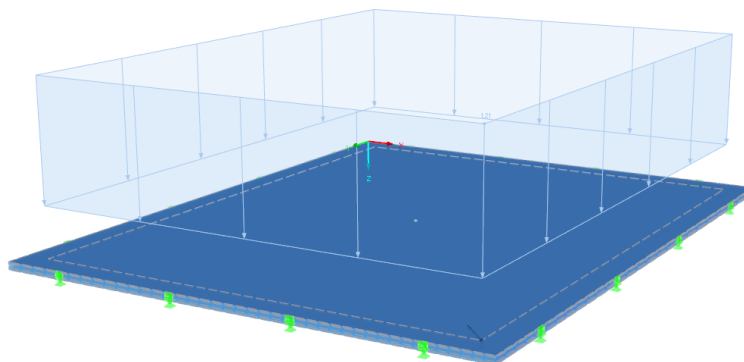
ZATĚŽOVACÍ STAVY PRO 110m – LÉTO

Zatížení pro trojskla

Zatížené jsou plochy ohraničující plynné tělesa. Spodní plochy plynných těles jsou zatíženy zatížením ve směru $+z(\downarrow)$, horní plochy ve směru $-z(\uparrow)$

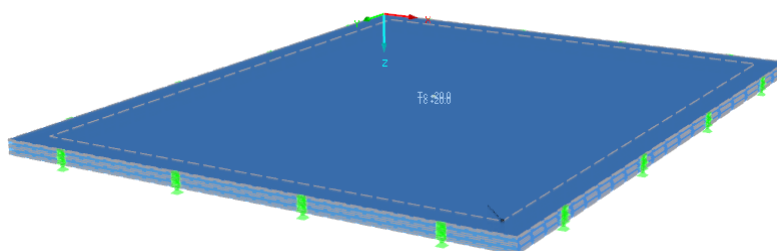
ZS1 - VÍTR

$$w_e = 1,21 \text{ kN/m}^2$$



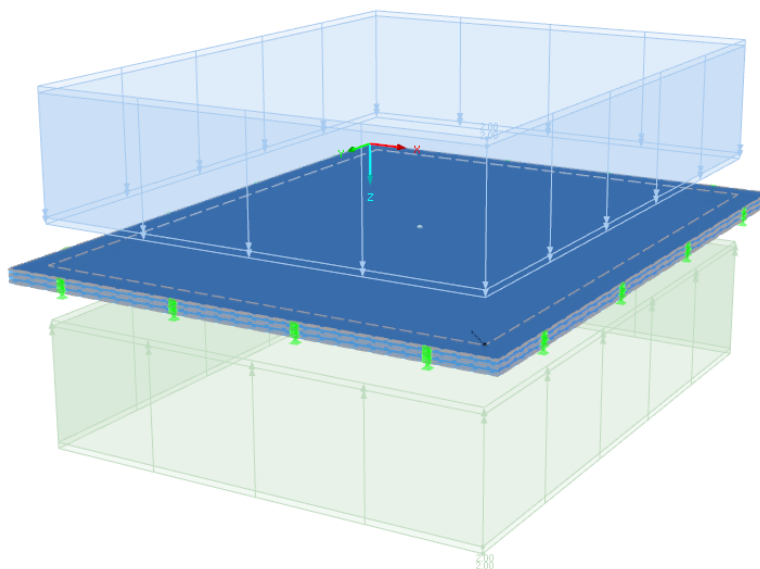
ZS2 - TEPLOTA

$$T_c = 20,0^\circ\text{C}$$



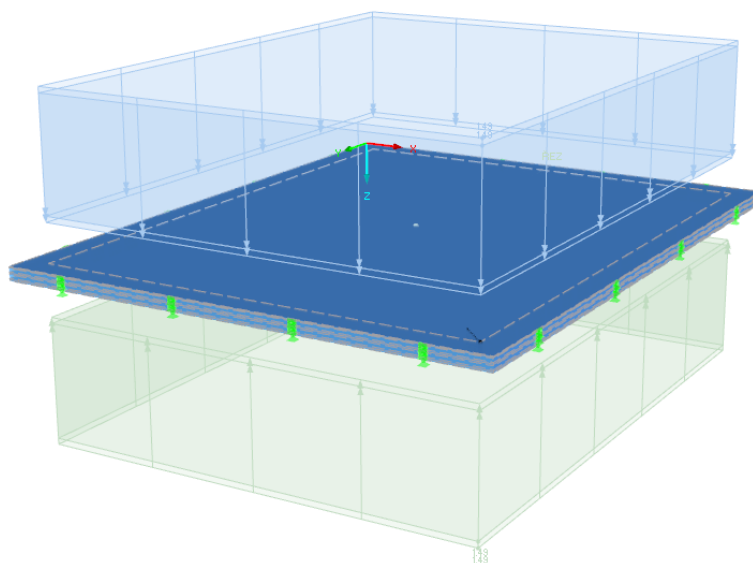
ZS3 - ATMOSFERICKÝ TLAK

$$\Delta p = \pm 2 \text{ kN/m}^2$$



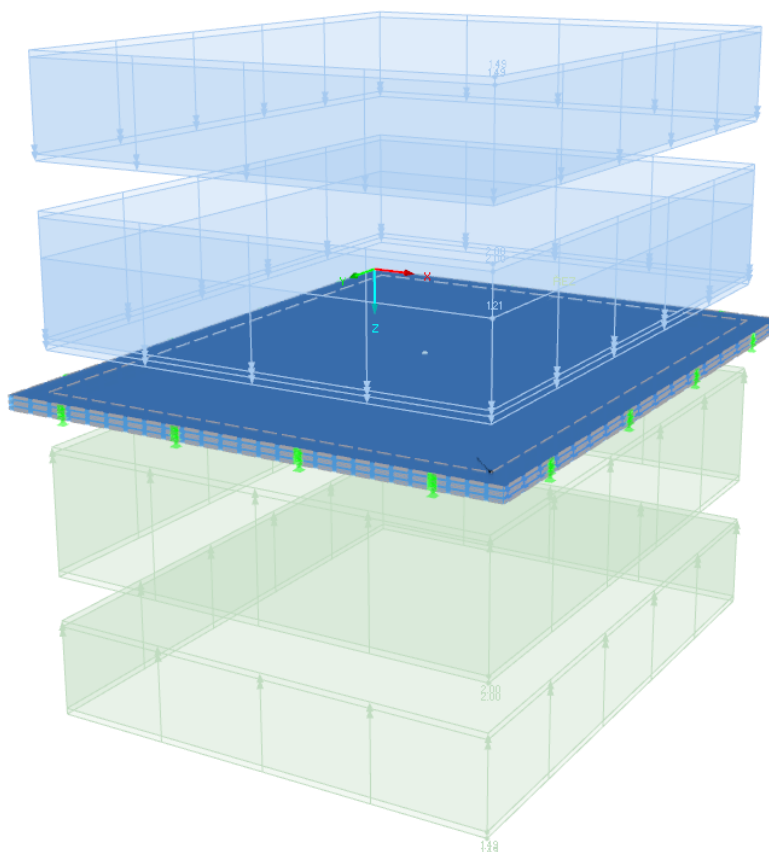
ZS4 - NADMOŘSKÁ VÝŠKA

$$\Delta H = \pm 1,49 \text{ kN/m}^2$$



KOMBINACE ZATÍŽENÍ

$$KZ1 = ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4$$



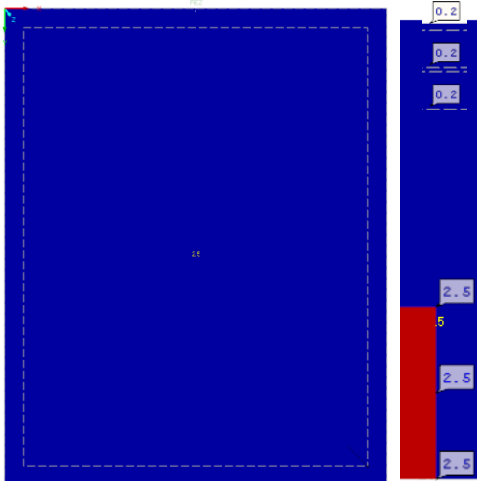
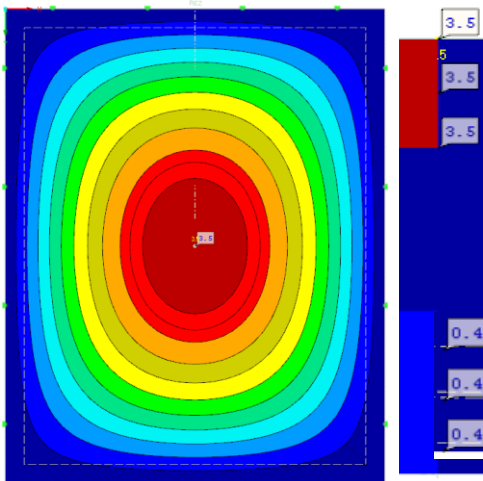
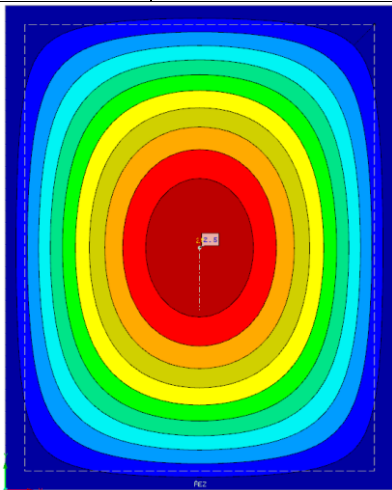
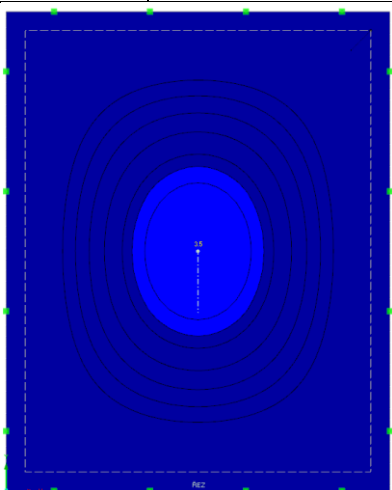
ZATĚŽOVACÍ STAVY PRO 110m – ZIMA

Zatížení pro trojskla

Princip zatížení je totožný se zatěžovacími stavy pro 5m v zimním období. Hodnoty jsou naopak totožné s hodnotami pro zatěžovací stavy pro 110m – LÉTO, až na $T_c = -25,0^\circ\text{C}$ a $\Delta p = \pm 4 \text{ kN/m}^2$.

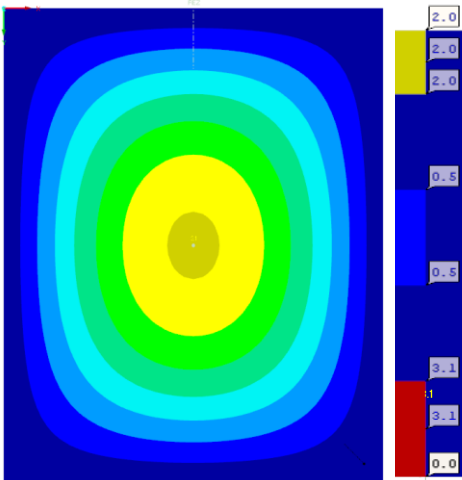
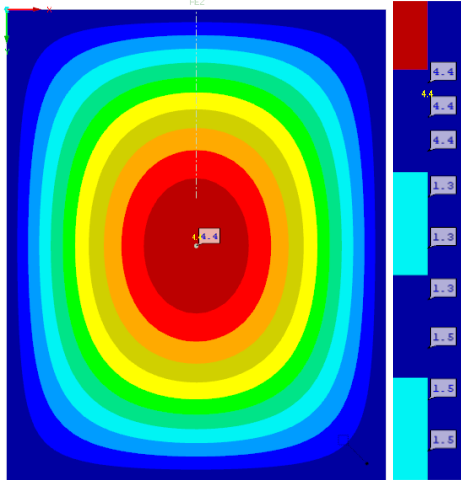
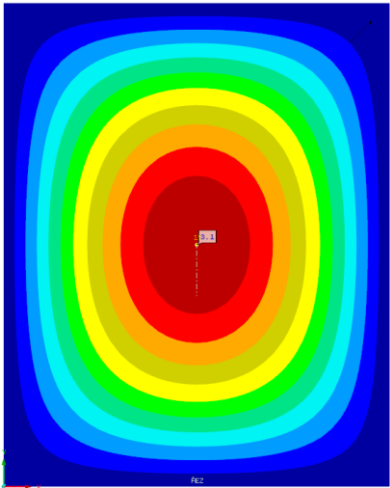
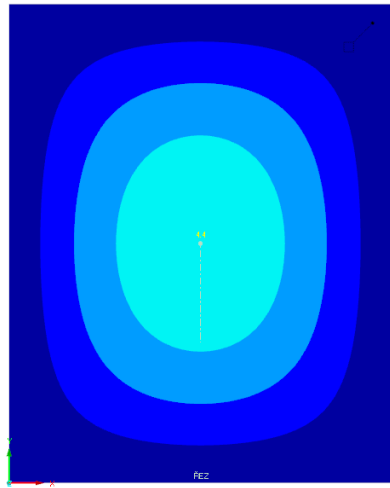
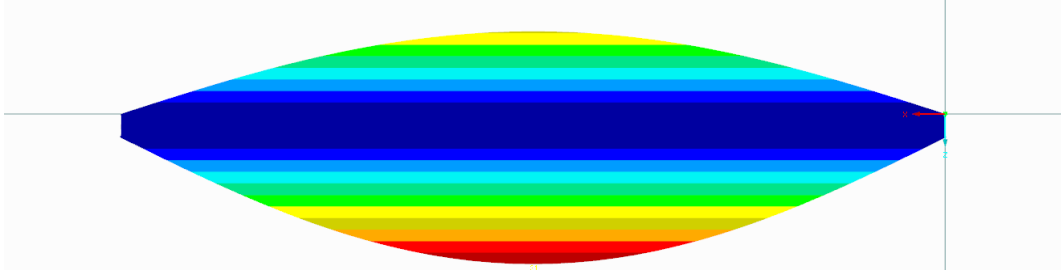
4.1.11 TABULKA VÝSLEDKŮ PRO DVOJSKLO VE 110M

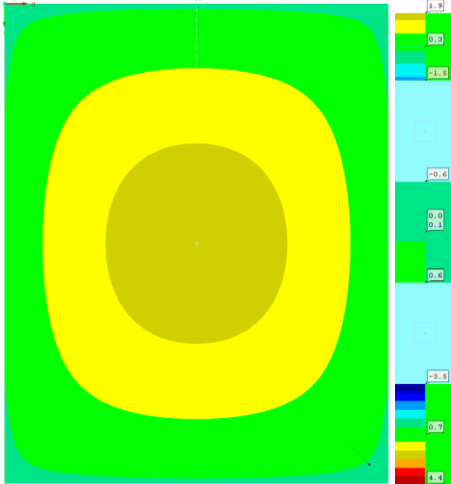
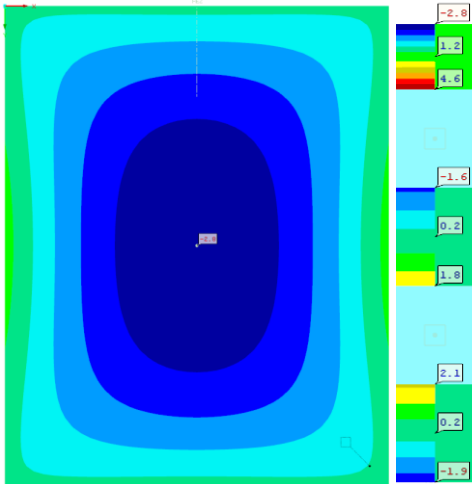
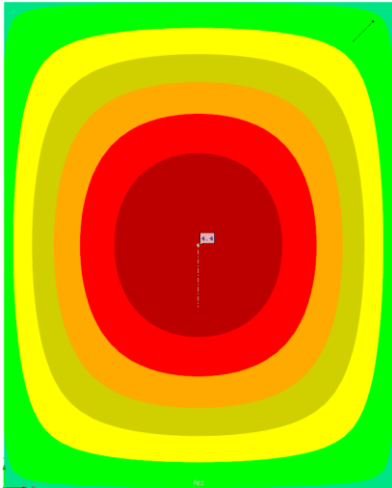
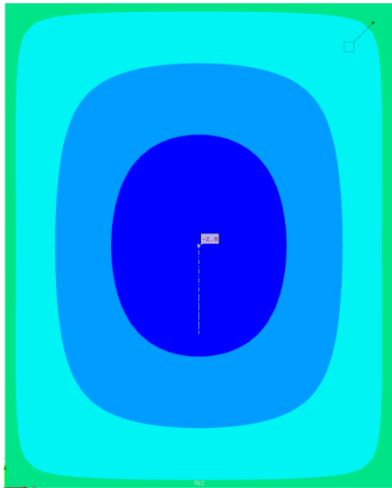
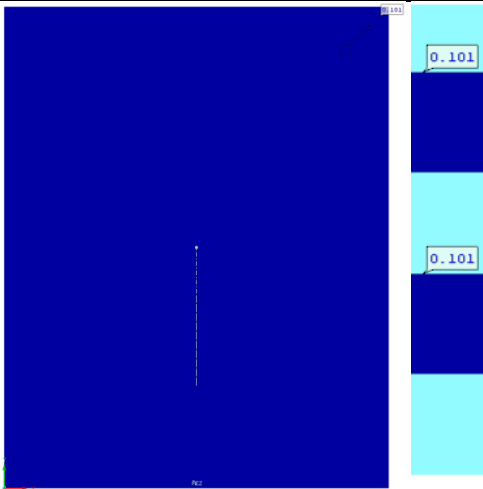
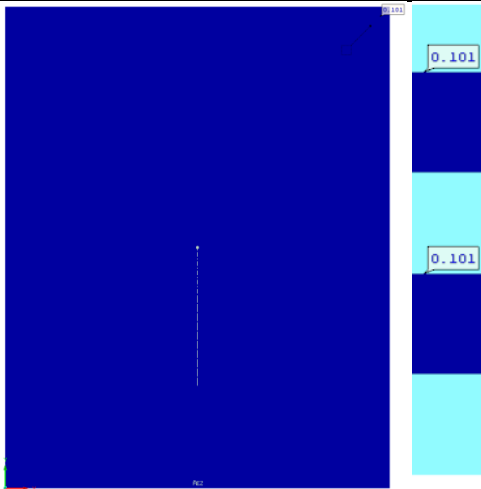
Budu uvádět pouze výsledky pro konečnou kombinaci, jelikož dílčí zatěžovací stavy jsou průběhově „totožné“ s výsledky, které platí pro 5m.

KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	PRŮHYB u			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$u = 0,2 \text{ mm}$	HORNÍ DESKA	$u = 3,5 \text{ mm}$
				
	DOLNÍ DESKA	$u = 2,5 \text{ mm}$	DOLNÍ DESKA	$u = 0,4 \text{ mm}$

KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,1 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -2,4 \text{ MPa}$
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 3,5 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 0,5 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
	$p_p = 0,101 \text{ MPa}$		$p_p = 0,102 \text{ MPa}$	

4.1.12 TABULKA VÝSLEDKŮ PRO TROJSKLO VE 110M

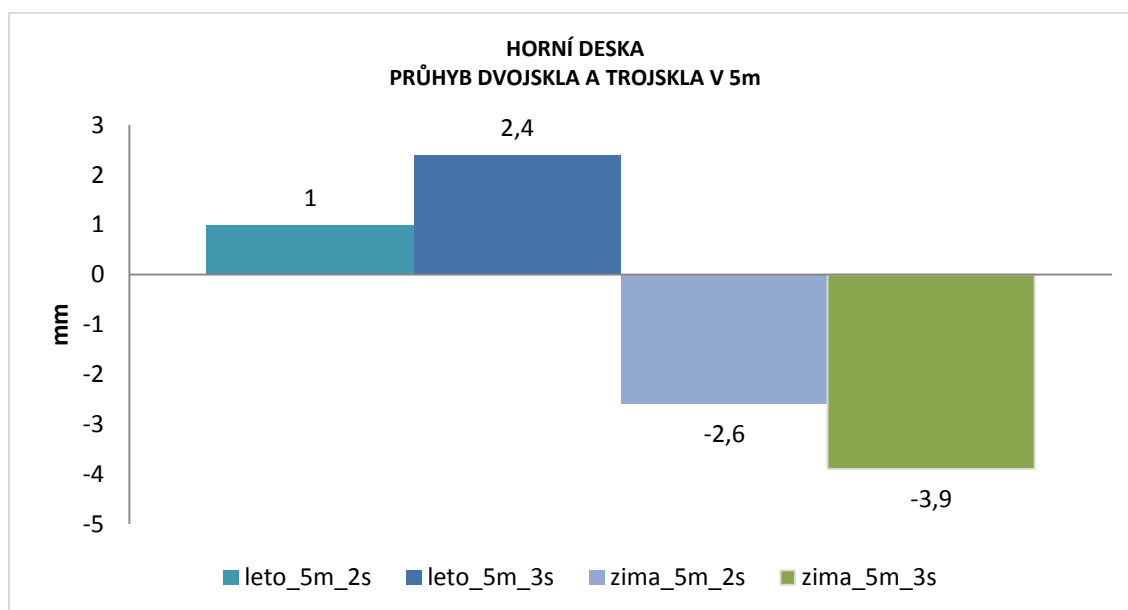
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	PRŮHYB u			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$u = -2,0 \text{ mm} (\uparrow)$	HORNÍ DESKA	$u = +4,4 \text{ mm} (\downarrow)$
				
	DOLNÍ DESKA	$u = +3,1 \text{ mm} (\downarrow)$	DOLNÍ DESKA	$u = -1,5 \text{ mm} (\uparrow)$
<p>LÉTO – 100X</p>  <p>Zde už vidíme klasický průběh průhybu izolačního skla v letním a zimním období.</p>				

KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	NAPĚTÍ σ_x			
	LÉTO		ZIMA	
				
	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = 1,9 \text{ MPa}$	HORNÍ DESKA	$\sigma_x = -2,8 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4				
	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = 4,4 \text{ MPa}$	DOLNÍ DESKA	$\sigma_x = -1,9 \text{ MPa}$
KZ1 – KOMBINACE ZATÍŽENÍ - ZS1+ZS2+ZS3+ZS4	TLAK PLYNU p_p			
	LÉTO		ZIMA	
				
	$p_p = 0,101 \text{ MPa}$		$p_p = 0,101 \text{ MPa}$	

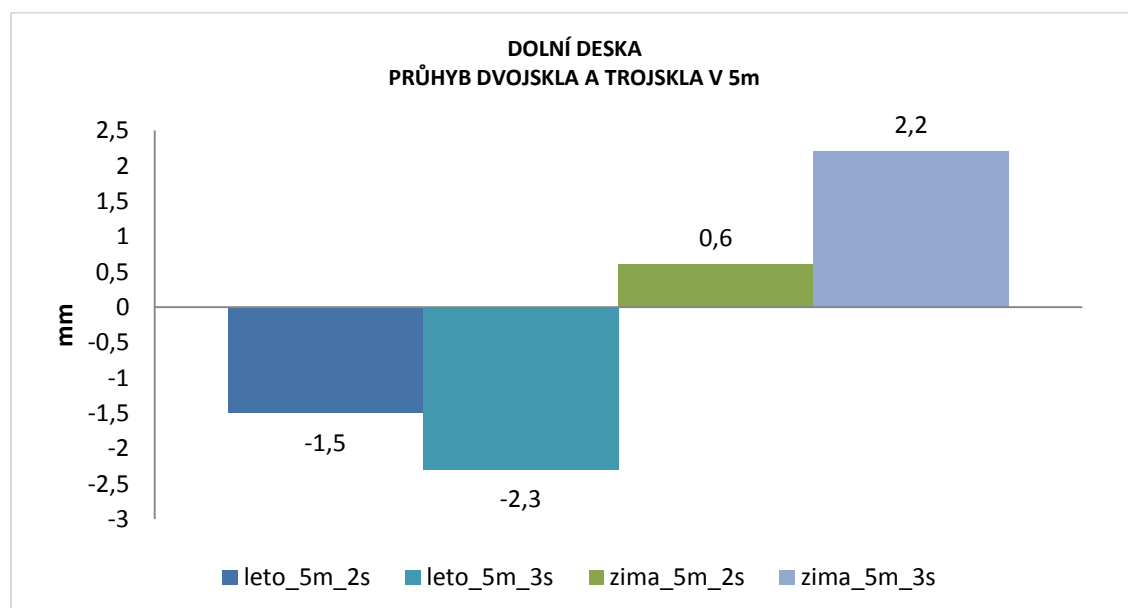
4.1.13 ZÁVĚR PŘÍKLADU Č. 2

Dle výsledků výše, jsem prokázala, že se izolační dvojsklo i trojsklo v zimním období smršťuje a v letním rozpíná. Na grafech níže jsou znázorněny průhyby dvojskel a trojskel v 5 a 110m. Z nich je zřejmé, že jak pro letní tak i pro zimní období a jak v 5m, tak ve 110m je výhodnější varianta použití DVOJSKEL.

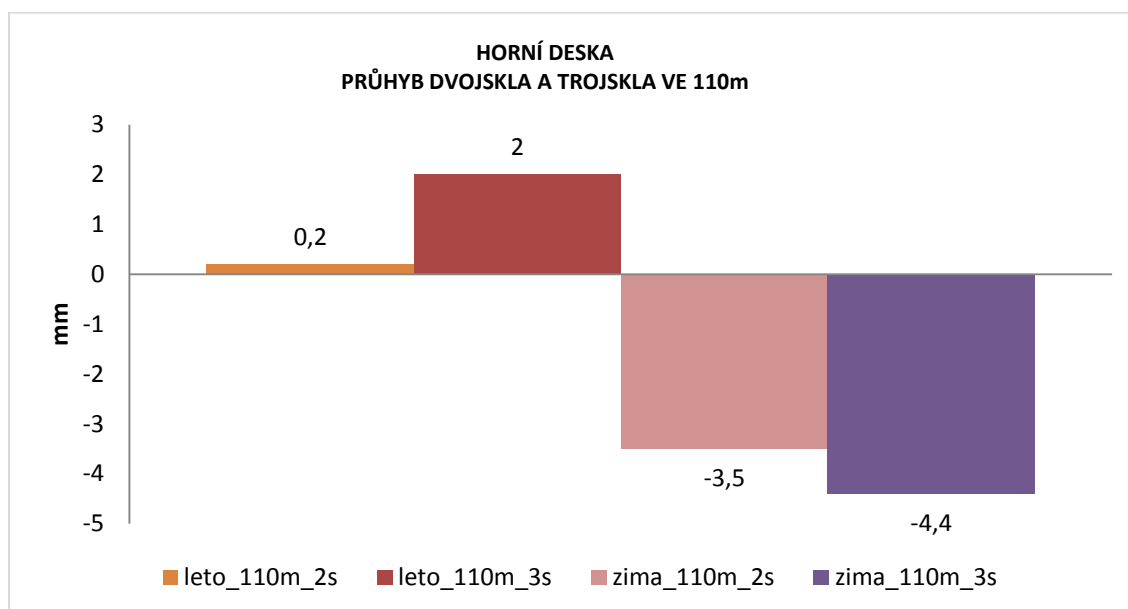
Trojskla jsou nevýhodná nejen z hlediska větších průhybů, ale také zvyšují finanční a materiálové náklady na pořízení. Trojskla se také moc nepoužívají hlavně pro jejich větší hmotnost. Jeden metr čtvereční tabule skla o tloušťce jeden milimetr váží 2,5 kg, z toho vyplývá, že váha dvojsklo se vypočte $32\text{mm} \times 5\text{m}^2 \times 2,5\text{kg} = 400\text{ kg}$ a trojsklo $56\text{mm} \times 5\text{m}^2 \times 2,5\text{kg} = 700\text{ kg}$. Větší hmotnost rovná se větší nároky na nosné konstrukce apod. Proto doporučuji použít dvojskla. Mnou navržená skladba byla nadhodnocena a pro reálné použití by stačila skladba 8-10-8, kde by bylo cca 50% využití.



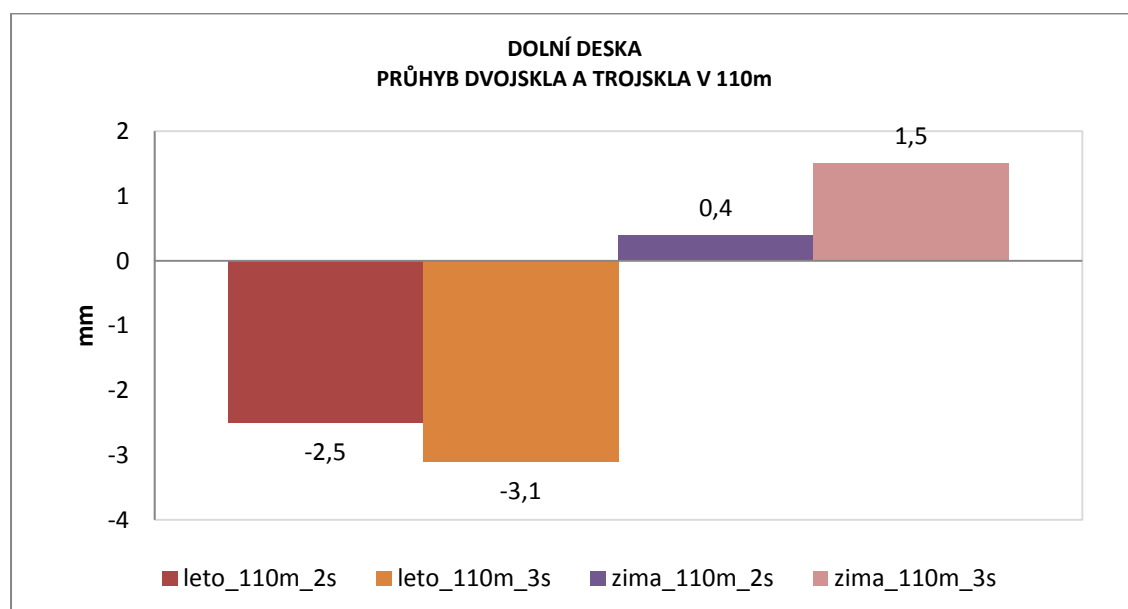
Graf 8 - Souhrnný průhybu horní desky v 5m



Graf 9 - Souhrnný průhybu dolní desky v 5m



Graf 10 - Souhrnný průhyb horní desky v 110m



Graf 11 - Souhrnný průhyb horní desky v 110m

Všechny výpočty vyhověly mezním hodnotám. Využití je u průhybu max 17% a u napětí okolo 10%, proto by postačila skladba 8-10-8. Mezní hodnota pro průhyb se stanoví jako $L_{\max} / 100 = 2500 / 100 = 25 \text{ mm}$ a pro napětí je to $\sigma_{\text{limitní}} / \gamma_M = 120 / 1,5 = 80 \text{ MPa}$.

$\sigma_{\text{limitní}}$ se získá z mezního napětí pro dané sklo. V našem příkladu jsem použila tepelně tvrzené sklo, které má dané parametry

Označení materiálu	Tloušťka t [mm]	Modul pružnosti E [N/mm ²]	Smykový modul G [N/mm ²]	Poissonův součinitel ν [-]	Objemová tíha γ [kN/m ³]	Souč. tepl. roztažnos α.T [1/K]	Mezní napětí σ _{limit} [N/mm ²]
Tepelně tvrzené plavené sklo	8.00	70000.000	28455.300	0.230	25.00	9.0E-06	120.000
Suchý vzduch	12.00				0.01		
Tepelně tvrzené plavené sklo	12.00	70000.000	28455.300	0.230	25.00	9.0E-06	120.000

Mezní hodnota pro sklo je pevnost v tahu. Dílčí součinitele pro vlastnosti materiálu a mezní stavy použitelnosti jsou pro sklo dány spíše smluvně podle německé normy DIN 18008, která u nás nemá

oficiální platnost, ale všichni se jí, pro orientaci, řídí. Je to tím, že v ČR není prozatím žádná platná plnohodnotná norma na navrhování skleněných konstrukcí.

Norma - DIN 18008:2010-12

Obecné

Díličí součinitele pro vlastnosti materiálu

Návrhová situace:

- Stálé a proměnné
 - pro tepelně tvrdné sklo γ_M : 1.50 [-]
 - pro ostatní sklo γ_M : 1.80 [-]
 - Mimořádné γ_M : 1.00 [-]

Konstrukční součinitel

- Pro tepelně tvrdné sklo k_C : 1.00 [-]
- Pro ostatní sklo k_C : 1.00 [-]

Modifikační součinitel

Třída trvání zatížení (TTZ):

- Stálé k_{mod} : 0.25 [-]
- Střední k_{mod} : 0.40 [-]
- Krátké k_{mod} : 0.70 [-]

Mezní stavy použitelnosti (průhyby)

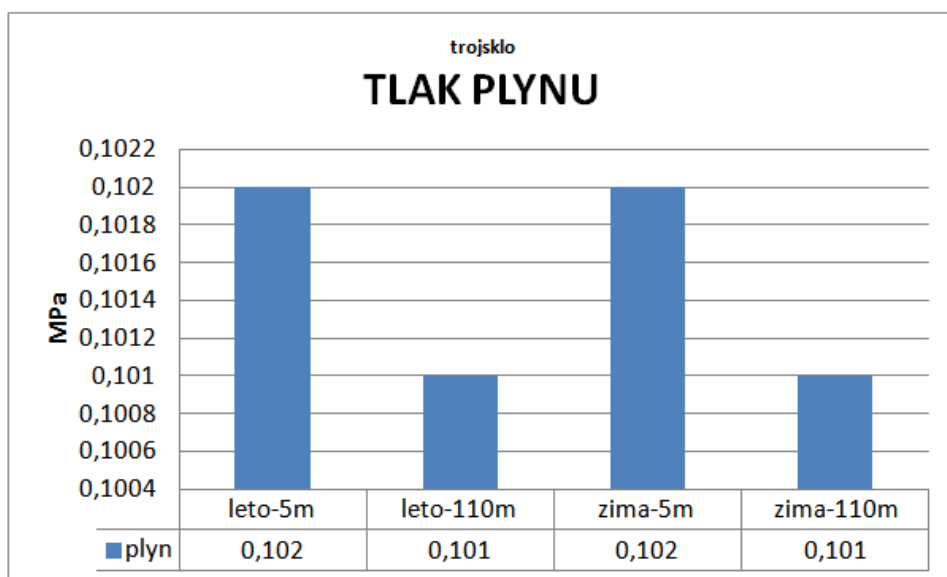
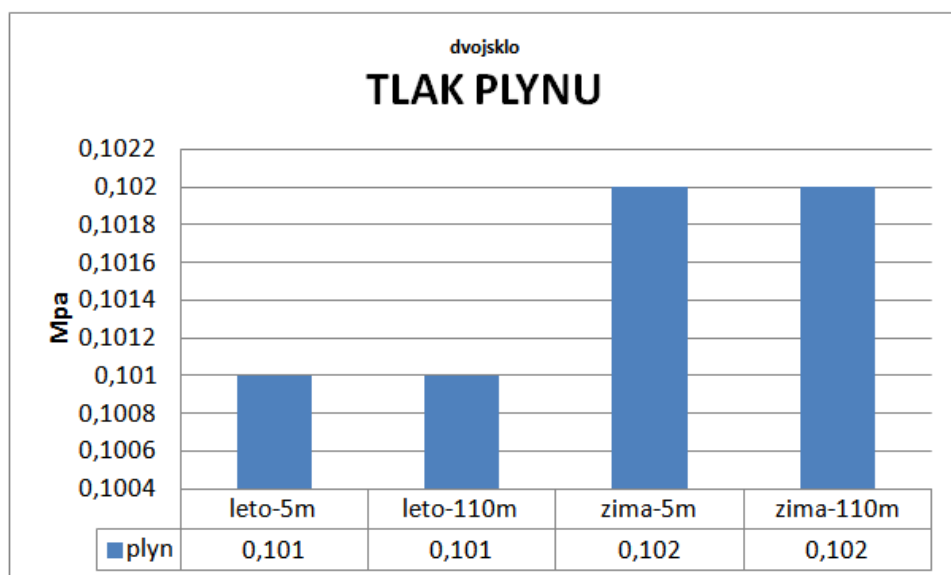
Typ kombinace:

- Charakteristická
 - L / 100
 - L_c / 50
- Častá
 - L / 100
 - L_c / 50
- Kvazistálá
 - L / 100
 - L_c / 50

Izolační sklo

Součinitel ZS pro klimatické zatížení

	Léto	Zima
- Teplotní	1.00 [-]	1.00 [-]
- Atmosférického tlaku	1.00 [-]	1.00 [-]
- Výšky	1.00 [-]	1.00 [-]



Tlak plynu je v celé komoře konstantní, což značí dobrou konvergenci výpočtu.

5. ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo nastínit problematiku vrstvených a izolačních skel používaných v praxi. Dílčím cílem, který jsem si stanovila v průběhu zpracování diplomové práce, bylo navrhnutí ideální skleněné konstrukce pro reálnou budovu v ČR. Dalším dílčím cílem bylo nastínění průběhu nárazu při kyvadlové zkoušce.

Jako metodu jsem zvolila dva charakteristické příklady (jeden pro vrstvená a jeden pro izolační skla), na kterých jsem se pomocí modelací a výpočtů v programu RFEM5 snažila nastínit optimální způsob výpočtu pro jednotlivá skla. Detailní závěry pro oba typy skel budou uvedeny samostatně.

Kyvadlová zkouška byla počítána explicitní metodou. Z výsledků lze pozorovat šíření vln po ploše skla od nárazu kyvadla.

Vrstvená skla

Problematika vrstvených skel vychází z jejich skladby. Mezi tabulemi skel se vždy nachází spojovací materiál, který má modul pružnosti o 3-7 řádů nižší než sklo. Tento fakt způsobuje problém při 2D výpočtu.

Výpočty s různým nastavením modulu pružnosti fólie jsem došla k následujícímu závěru. Je-li modul pružnosti fólie k/k_e modulu pružnosti skla v poměru 0.003 a menší, je nutno využít pro výpočet 3D metodu výpočtu. V opačném případě postačí zjednodušený 2D výpočet.

Dílčím cílem bylo určení tloušťky skla, pro které je možné využít 2D výpočet. Pokud je skleněná deska řazena mezi tzv. tlusté desky, lze využít 2D výpočet bez smykového spřažení vrstev. V jiných případech doporučuji při výpočtu vrstvených skel 3D výpočet.

Izolační skla

Výjimečností izolačních skel je přítomnost plynného tělesa, díky kterému musí probíhat výpočet nelineárně. Plyn je v celém objemu konstantní.

Za pomoci modelací a výpočtů jsem poukazovala na změny tvaru v letním a zimním období v různých nadmořských výškách pro izolační dvojskla a trojskla. Hlavním cílem bylo doporučení použití dvojskla či trojskla. Z výsledků je zřejmé, že použití dvojskel je výhodnější.

Dílčím cílem bylo zjištěno, že mnou navržená skladba byla nadhodnocena a stačila by 8-10-8, kde by bylo 50% využití.

Co by se dalo dále prozkoumávat, v popř. disertační práci, by bylo upevnění skla k nosné konstrukci. Je to z toho důvodu, že pokud se musí do tabule skla vrtat, hrozí okolo otvoru větší riziko vzniku mikrotrhliny a sklo může prasknout. Bylo by tedy zajímavé hrát si s 3D modelem upevnění a vytvářet mikrotrhlinky v okolí a zkoumat dané napětí. Další novinky jsou hybridní skleněné nosníky. Jedná se o nosníky, kdy část je ze skla a další část je z materiálu, jako je ocel, beton a dřevo. Tato novinka se hojně zkoumá na doktorských programech na ČVUT.

Mimo téma bych chtěla dodat, že sklo a jeho použití má nesmírných rozsah. Každé 2 roky se konají celosvětové konference, kde se ukazují novinky. Velice zajímavé je světlo ve skle, kdy pomocí tenké vodivé vrstvy se umožní vnést proud do tabule skla, kde jsou uvnitř zabudovány mini LED diody. Takové skla se používají do schodnicového stupně, v automobilovém průmyslu to umísťují do světel apod. Velmi oblíbené se také stávají skleněné obklady do kuchyní, kdy se nechá udělat přímo na míru jedna tabule skla s potiskem.

Závěrem bych chtěla poděkovat těmto lidem za cenné rady a odbornou pomoc:

Mgr. Vítězslav Štembera, Ph.D.,

Ing. Ivan Ševčík, Ph.D.,

Ing. Ondřej Čížek,

Lubor Semrád – STRAND s.r.o.,

Jiří Maršálek – PROPERTY s.r.o.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] **AGC.** *AGC - YOURGLASSPOCKET.* Teplice : oddělení marketingové komunikace – AGC Glass Europe , 2010.
- [2] **Haldimann, Matthias.** *Diplomová práce - Fracture strength of structural glass elements - analytical and numerical modelling, testing and design.* Lausanne : Diplomová práce, 2006.
- [3] Vlastnosti použitých skel. *Technosklo, Ltd.* [Online] Yettisoft. [Citace: 2. prosinec 2013.] <http://www.technosklo.com/cz/index.php?page=ke-stazeni/laboratorni-sklo/vlastnosti-pouzitych-skel>.
- [4] **Laufs, W. a Luible, A.** *Úvod do použití sklav moderních budovách.* Praha : Vydavatelství ČVUT Praha, výroba, 2003. ISBN 80-01-02849-6.
- [5] České vysoké učení technické v Praze - fakulta stavební. *Mechanické vlastnosti skla.* [Online] 2007. [Citace: 5. listopad 2013.] http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/text/specialiste/3/3-2_Mechanicke_vlastnosti_skla.pdf.
- [6] TZB-info. *TZB-info.* [Online] 2001. [Citace: 12. listopad 2013.] <http://stavba.tzb-info.cz/okna-dvere/6403-distancni-ramecky-zasklivacich-jednotek-a-jejich-vzajemna-interakce-s-teplotnim-faktorem-vnitriho-povrchu>.
- [7] SAINT-GOBAIN GLASS SOLUTIONS CZ, s.r.o. *SAINT-GOBAIN GLASS SOLUTIONS CZ, s.r.o.* [Online] [Citace: 12. listopad 2013.] <http://www.izolas.cz/izolacni-sklo.php>.
- [8] **s.r.o., Ing. Software Dlubal.** *RF-GLASS Posouzení jednovrstvého, vrstveného a izolačního skla.* Praha : Ing. Software Dlubal s.r.o., 2012.
- [9] **Ing. Weis, L.** *Vrstevnaté desky bez smykového spřezení.* Brno : autor neznámý, 2011.
- [10] **Doc. Ing. Němec, CSc., I.** *Nelineární mechanika.* Brno : autor neznámý, 2006.
- [11] **Ing. Vořechovský, Ph.D, M.** *Pružnost a plasticita.* Brno : autor neznámý, 2005.
- [12] **Wurm, Jan.** *Glass structures design and construction of Self-supporting skins.* Basel-Boston-Berlin : Birkhauser Verlag AG, 2007. ISBN 978-3-7643-7607-9.
- [13] **Ofner, Robert.** *Glasbau Skript - Leichtbau und Glasbau.* Graz : Technische Universitat Graz, 2007.
- [14] **Beason, L. W. a kolektiv.** *Gana Glazing manual .* místo neznámé : Association of North America, 2010.
- [15] TP eurookna s.r.o. *TP eurookna s.r.o.* [Online] TP eurookna s.r.o. [Citace: 5. listopad 2013.] <http://www.tpeurookna.cz/rs/zimni-zahrady/>.
- [16] **SKLO, ACERA.** *ACERA SKLO . ACERA SKLO .* [Online] ACERA SKLO , 2011. [Citace: 5. listopad 2013.] <http://www.acera.cz/zabradli-interierove>.
- [17] **Thought, Open Box.** *Deck view glass and railing. Deck view glass and railing.* [Online] Open Box Thought, 2012. [Citace: 5. listopad 2013.] <http://www.deckviewglassandrailing.ca/deckview-images/topless-glass-railing-on-golf-course-1/>.
- [18] Oobject a curation curation. *Oobject a curation curation.* [Online] [Citace: 5. listopad 2013.] <http://www.oobject.com/transparent-glass-stairs/duPont-all-glass-stair/1982/>.

- [19] **AgnosticPreachersKid**. File:1999 K Street NW.JPG. *File:1999 K Street NW.JPG*. [Online] 28. červenec 2009. [Citace: 5. listopad 2013.] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:1999_K_Street_NW.JPG.
- [20] White-lines. *White-lines*. [Online] [Citace: 5. listopad 2013.] <http://www.white-lines.cz/bezramove-proskleni.php>.
- [21] **Dorma**. Dorma. *Dorma*. [Online] 2014. [Citace: 5. listopad 2013.] http://www.dorma.com/us/en/products/dividing/interior_glass_wall_systems/interior_glass_wall_systems_ansi/index-2275-2861-2875.html.
- [22] **institut, Český normalizační**. ČSN EN 1279-1: Sklo ve stavebnictví - Izolační skla - Část 1: Obecné údaje, tolerancerozměrů a pravidla pro popis systému. Brusel : Český normalizační institut, 2004.
- [23] **Berries, Laros Web**. Oknoservis s.r.o. *Oknoservis s.r.o.* [Online] Laros, 2013. [Citace: 12. listopad 2013.] http://www.dvere-okna-plastovahlinikova.cz/p/images.php?path=sklo/sklo_izolacni_dvojskla_troj-big.jpg.
- [24] Glass Scratch Removal. *Glass Scratch Removal*. [Online] 2007. [Citace: 12. listopad 2013.] http://www.glass-scratch-removal.com/articles/what_type_of_scratched_glass_is_repairable.html.
- [25] Xinology. *Xinology*. [Online] 1989-2013. [Citace: 13. listopad 2013.] <http://xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-Supplies-Consumables/glass-laminating/PVB-interlayer/overview/introduction.html>.
- [26] **Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví**. ČSN EN ISO 12543-1: Sklo ve stavebnictví - Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo - Část 1: Definice a popis součástí. Brusel : Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [27] **PROPERITY s.r.o.** *PROPERITY s.r.o.* [Online] [Citace: 30. listopad 2013.] http://properity.cz/system/images/im_v79full.jpg.

7. Seznam použitých zkratk a symbolů

E	Youngův modul pružnosti [Pa]
G	Smykový modul [Pa]
ν	Poissonova konstanta [–]
ρ	Objemová hmotnost při 18°C [kg/m ³]
$H_{K_{0,1/20}}$	Tvrdost podle Mohsovy stupnice [–]
T_t	Teplota tavení [°C]
T_m	Teplota měknutí [°C]
α	Součinitel délkové teplotní roztažnosti [–]
λ	Tepelná vodivost [W/(m·K)]
c_p	Tepelná kapacita [J/(kg·K)]
n	Index lomu ve srovnání s indexem lomu vzduchu [–]
$f_{t,k}$	Charakteristická pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]
$f_{c,k}$	Charakteristická pevnost v tlaku [N/mm ²]
$z_{i,min}$	Minimální z-souřadnici [mm]
$z_{i,max}$	Maximální z-souřadnici [mm]
d_{ij}	Prvky matice tuhosti vrstvy [Pa]
D_{ij}	Prvky globální matice tuhosti [Nm,Nm/m,N/m]
ε	Přetvoření [–]
σ_x, σ_y	Normálové napětí ve směru [Pa]
m_x	Ohybový moment vyvolávající napětí ve směru osy x [Nm/m]
m_y	Ohybový moment vyvolávající napětí ve směru osy y [Nm/m]
m_{xy}	Kroutící moment [Nm/m]
v_x, v_y	Posouvající síly [N/m]

n_x	Normálová síla se směru osy x [N/m]
n_y	Normálová síla se směru osy y [N/m]
n_{xy}	Smykový tok [N/m]
u_z	Průhyb ve směru z [mm]
l_{FE}	Požadovaná délka konečného prvku [m]
H_1	Nadmořská výška při výrobě [m]
H_2	Nadmořská výška při montáži [m]
ΔH	Rozdíl nadmořských výšek $H_2 - H_1$ [m]
T_p	Teplota při výrobě [K]
T_{ext}	Teplota na vnější straně skla (montáž) [K]
T_{int}	Teplota na vnitřní straně (montáž) [K]
T_1	Teplota plynu (montáž) [K]
$p_{p,met}$	Atmosférický tlak při hladině moře (výroba) [Pa]
$p_{p,out}$	Atmosférický tlak při hladině moře (montáž) [Pa]
p_p	Tlak při výrobě [Pa]
p_{out}	Venkovní tlak v místě montáže [Pa]
p_1	Tlak plynu v místě montáže [Pa]
V_0	Počáteční objem plynu [m ³]
V_1	Konečný objem plynu [m ³]

8. Seznam příloh

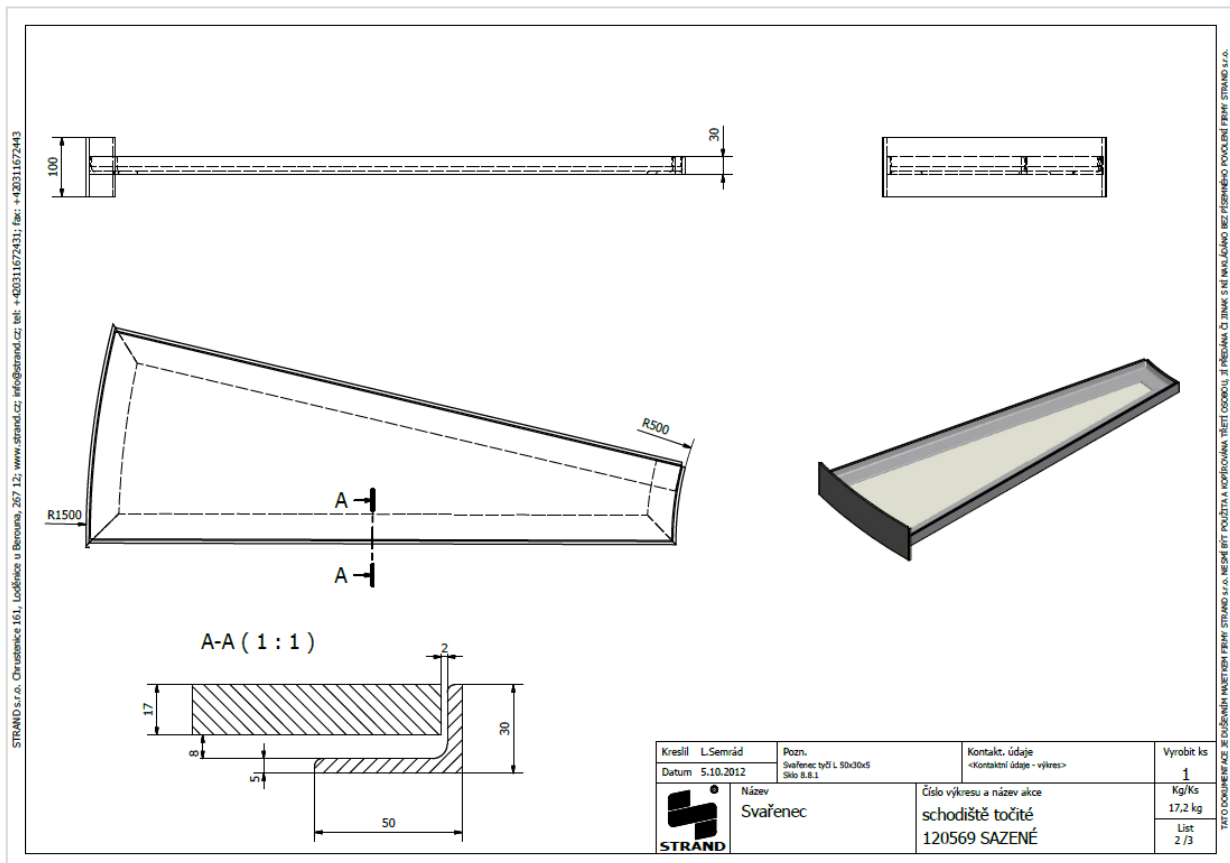
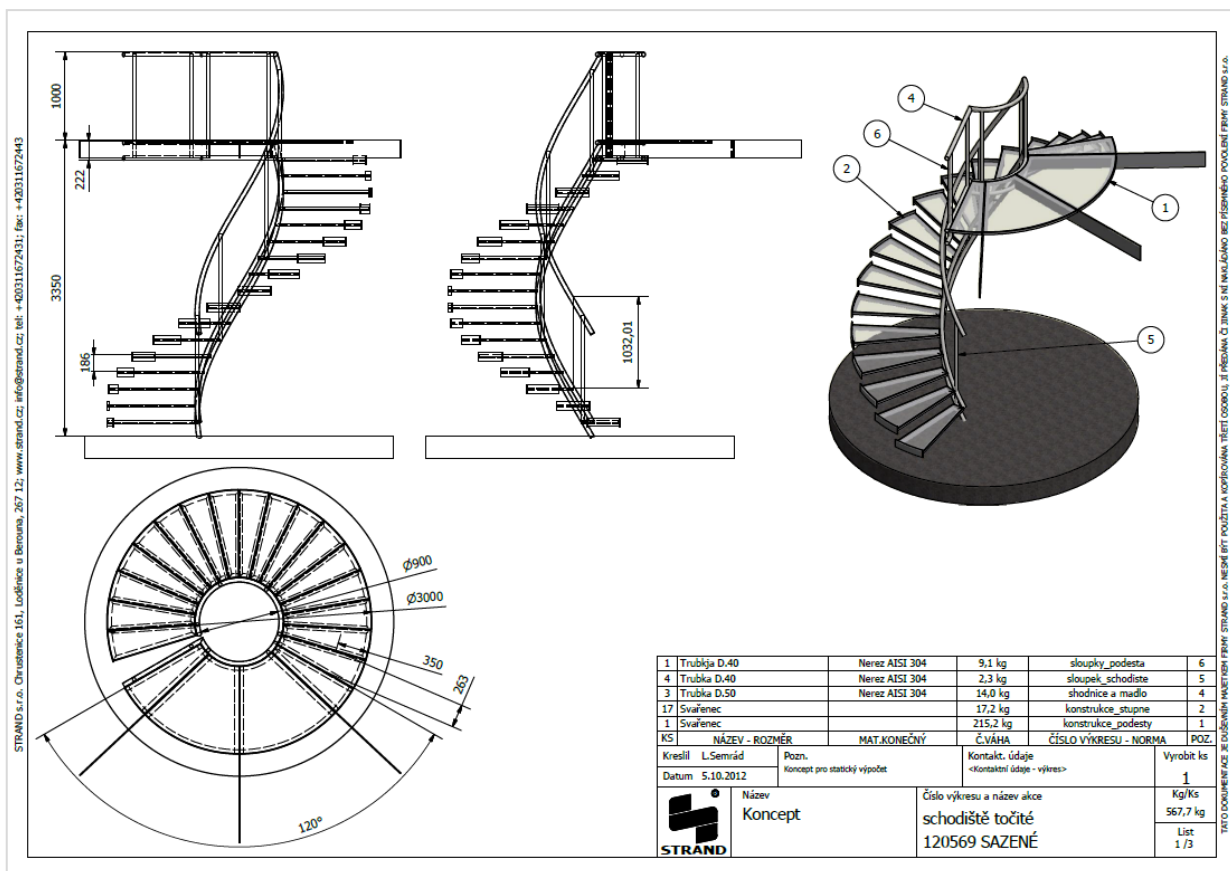
Příloha 1 – STRAND točité schodiště

Příloha 2 – Výpočet celkové deformace schodiště a návrh skladby schodů a zábradlí

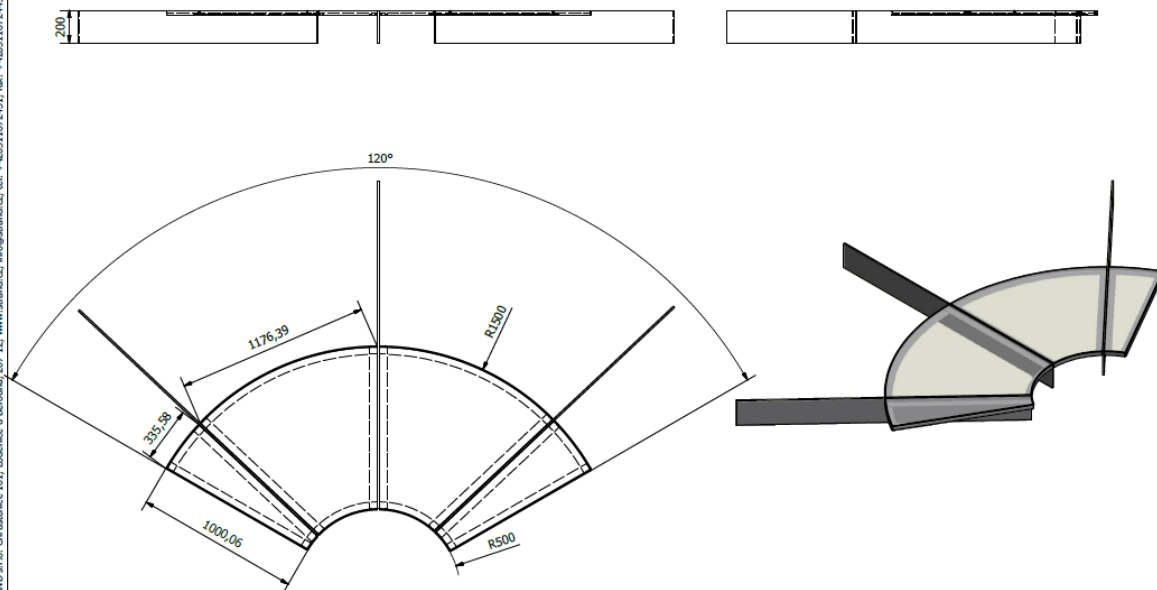
Příloha 3 – AZ Tower okna


Příloha 1

STRAND TOČITÉ SCHODIŠTĚ



STRAND s.r.o. Chrástská 161, Lodišice u Berouna, 267 12; www.strand.cz; info@strand.cz; tel: +42031672431; fax: +42031672443



Kreslil L.Semrád	Pozn. Svařenec byl L 50x30x5	Kontakt. údaje <Kontaktní údaje - výkres>	Vyrobil ks
Datum 5.10.2012	Šlo 10.10.1		1
	Název Svařenec	Číslo výkresu a název akce schodiště točité 120569 SAZENÉ	Kg/Ks 215.2 kg
			List 3 / 3

TOTO DOKUMENT JE DUŠEVNÍ MAJETKEM FIRMY STRAND s.r.o. NESMÍ BÝT POUŽITO A KOPÍROVÁNO TŘETÍ OSOBOU. JEDNÁ O ZÁKAZNÍKOVU VÝKRESOVOU DOKUMENTACI. VÝKRES JE VLASTNÍM VÝKRESOVÝM PRŮVODNÍM FIRMY STRAND s.r.o.

Příloha 2

Výpočet celkové deformace schodiště a návrh skladby schodů a zábradlí



Schodiště bylo vymodelováno tak, aby nedocházelo k přenášení zatížení od nosné konstrukce do skla.

Zábradlí: Tabule skla byly vypočteny v souladu s těmito normami:

- ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb

Schod: Byly uvažovány 3 ZS:

ZS1 – Vl. tíha konstrukce

ZS 2 - Plošné užitné zatížení schodiště dle normy ČSN EN 1991-1-1, kategorie A - $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$

ZS3 - Bodové zatížení schodiště dle normy ČSN EN 1991-1-1, kategorie A $Q_k = 2,0 \text{ kN}$

Kombinace:

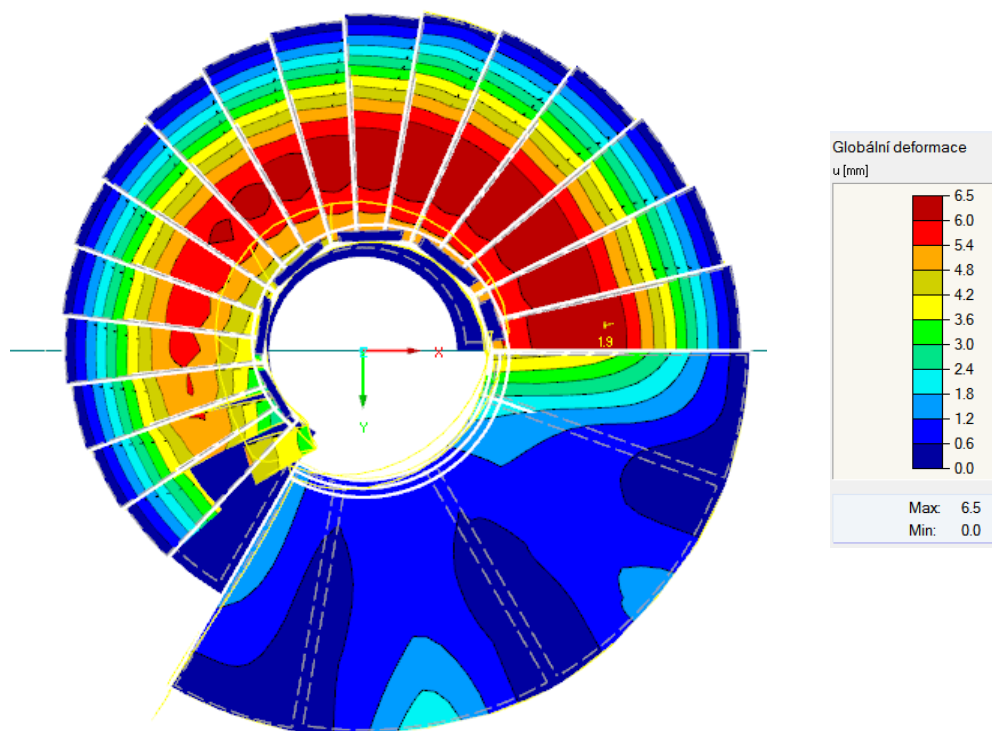
Existující kombinace zatížení		KZ č.	Označení kombinace zatížení	Řešit
KZ1	1.35*ZS1 + 1.5*ZS2 + 1.5*ZS3	1		<input checked="" type="checkbox"/>

Existující zatěžovací stavy		Zatěžovací stavy v kombinaci zatížení KZ1		
ZS1	Vl. tíha	1.35	ZS1	Vl. tíha
ZS2	Plošné zatížení	1.50	ZS2	Plošné zatížení
ZS3	Bodové zatížení	1.50	ZS3	Bodové zatížení

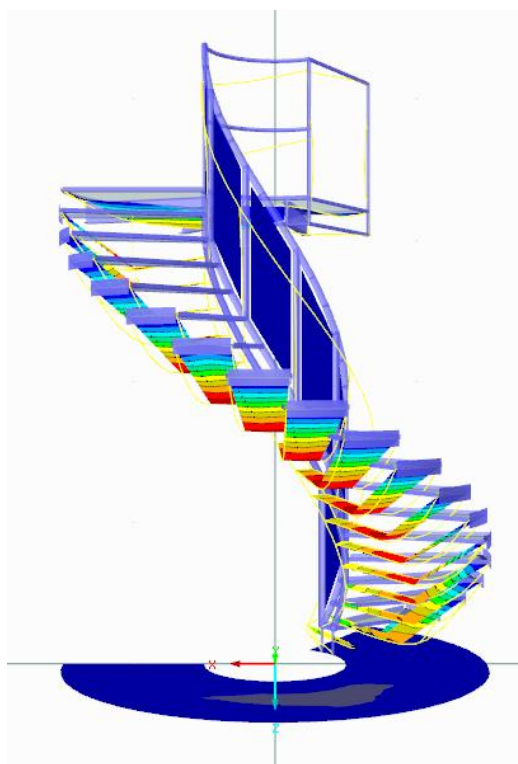
Výsledky:

Z výsledků numerické simulace a požadavků, které jsou kladeny na tento druh konstrukce, vychází:

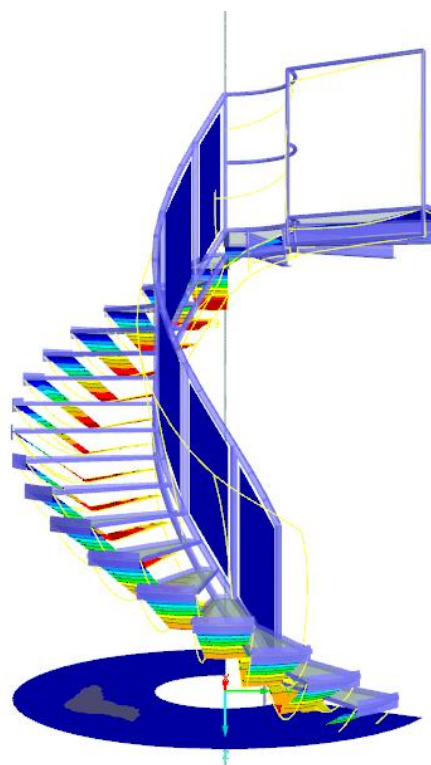
- Navržená skladba vrstveného skla 2 x 8 mm + 0,76 mm PVB vyhovuje na dané návrhové zatížení.
- $\gamma_G = 1,35$ a $\gamma_Q = 1,50$, čili $q_d = 4,5 \text{ kN/m}^2$ a $Q_d = 3,0 \text{ kN}$
- Při těchto hodnotách došlo k maximálnímu tahu při ohybu, který nepřekročil hodnotu 120 MPa kdy sklo praskne.



Obr. 57 - Pohled ve směru z – 200x



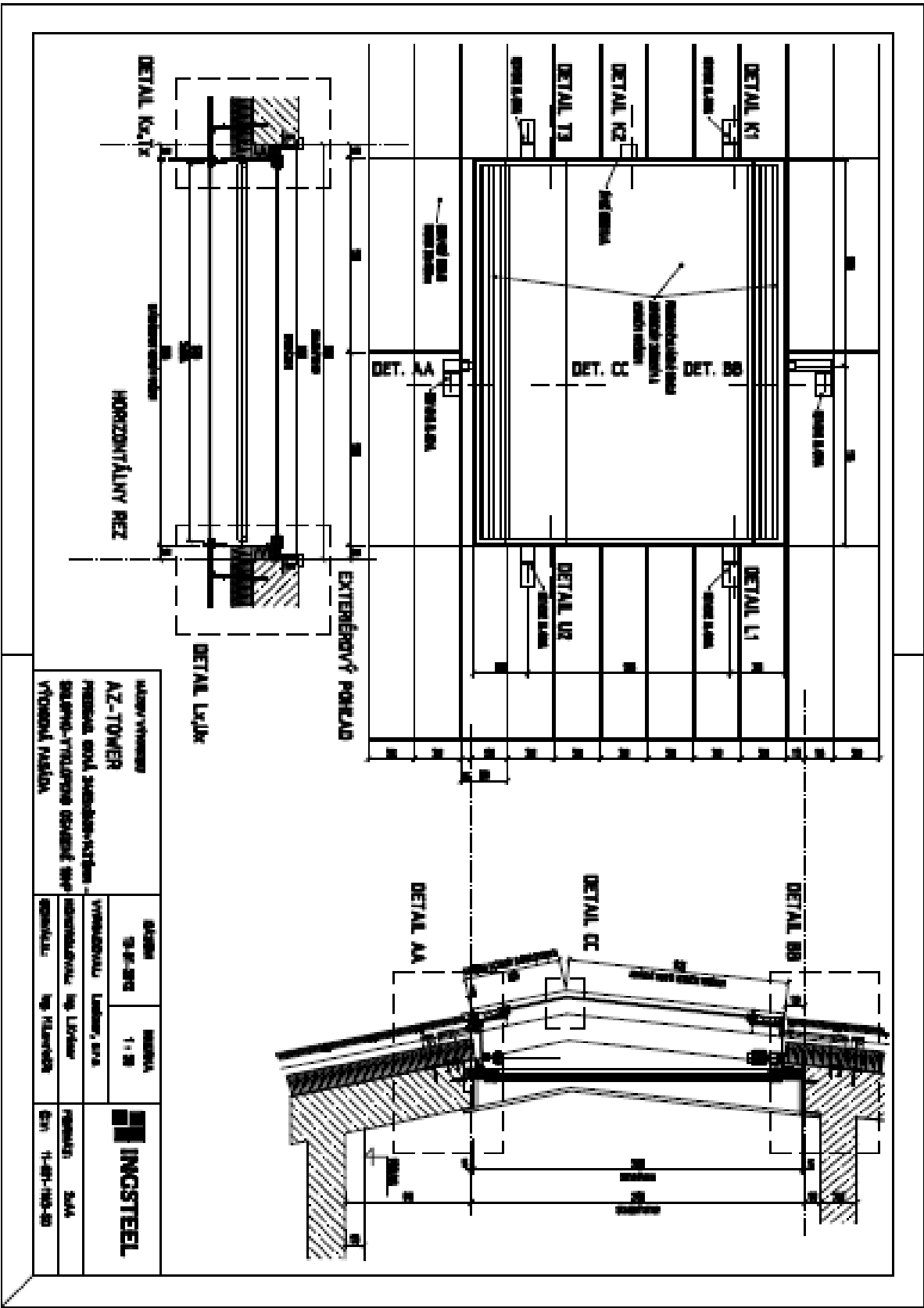
Obr. 58 - Pohled ve směru y – 200x

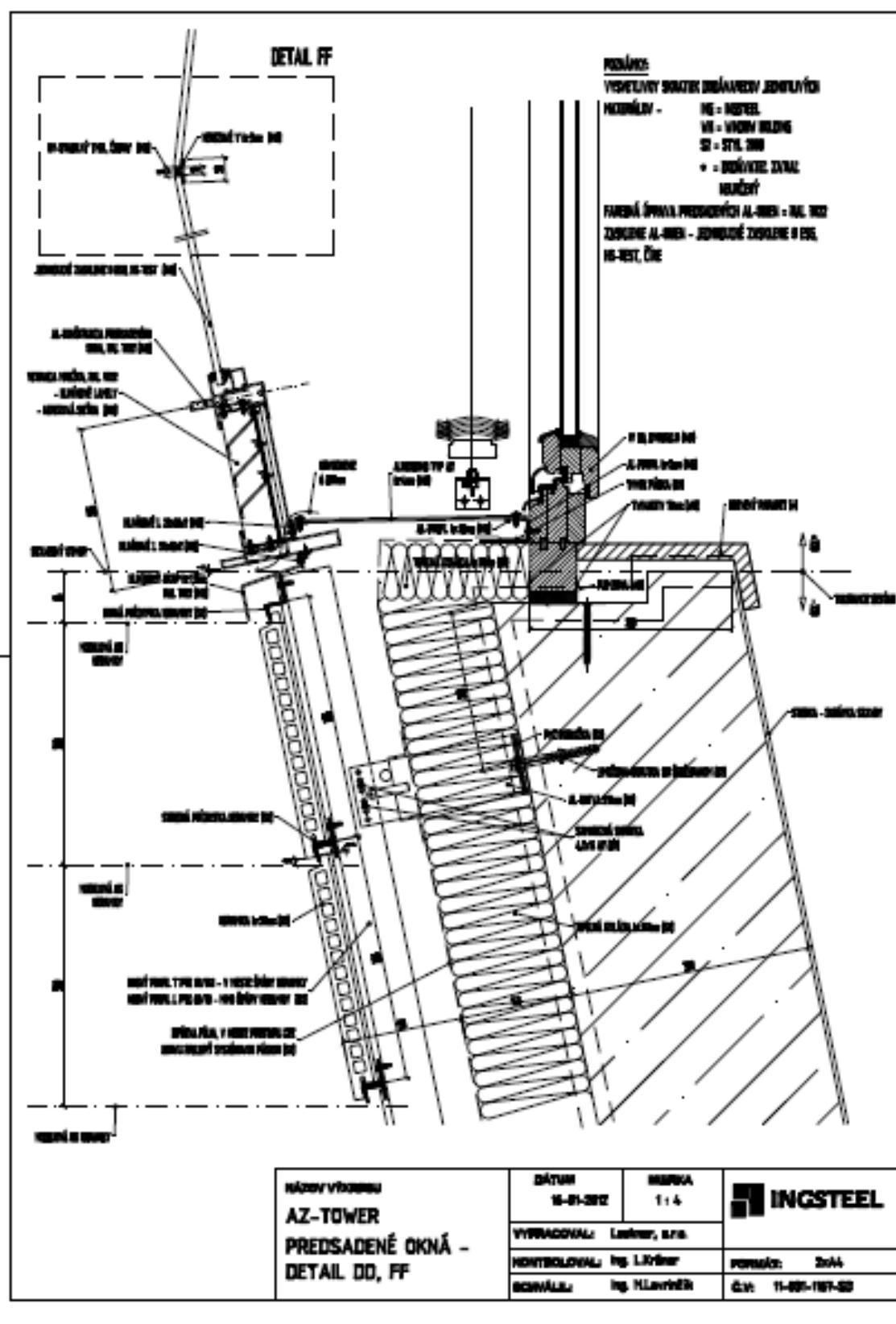


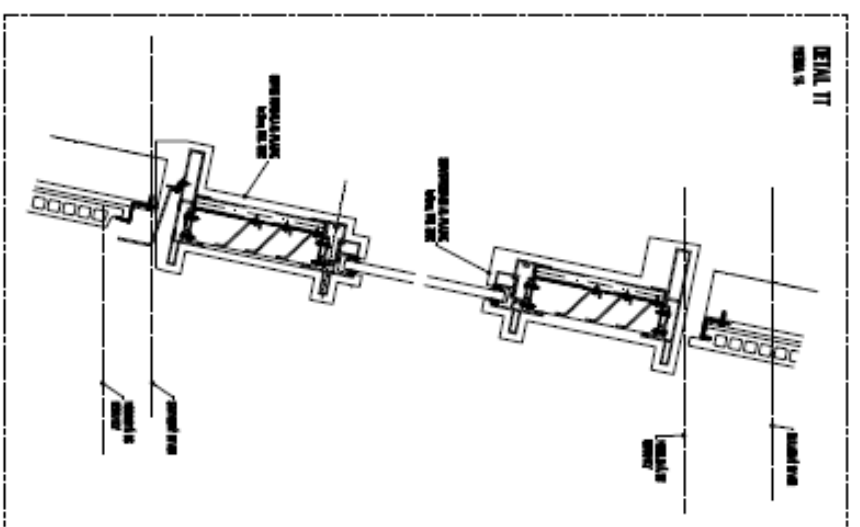
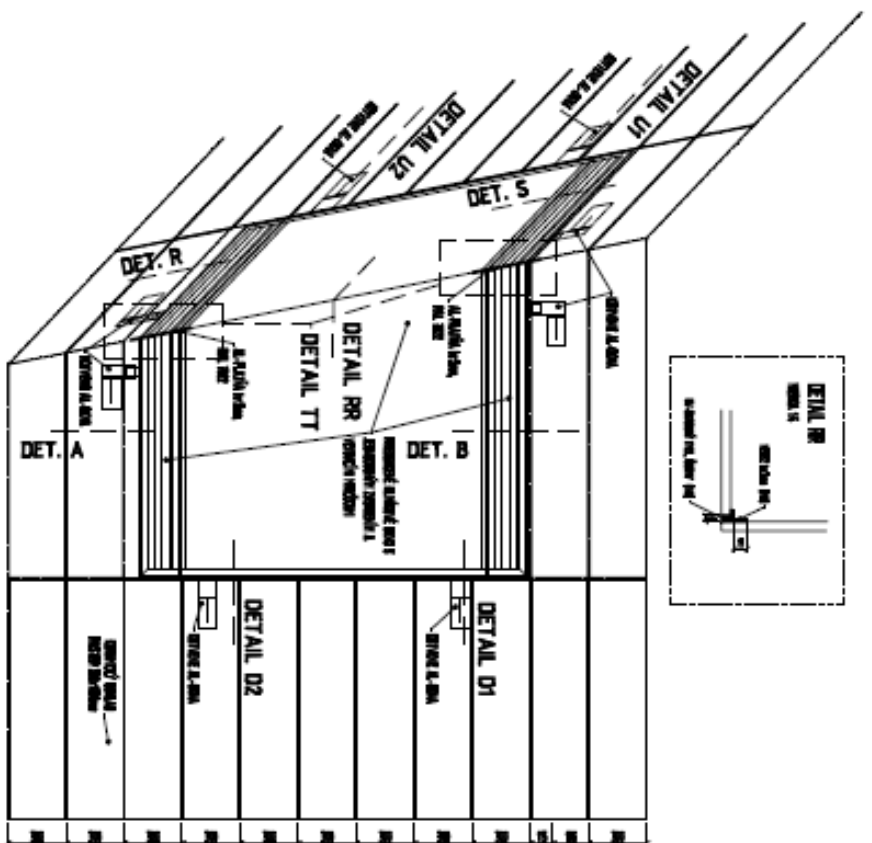
Obr. 59 - Pohled ve směru x – 200x

Příloha 3

AZ TOWER OKNA







**RAZOVÝ VÝKRES
AZ-TOWER
PŘEDSAD. OKOL. -
POHLEDY - VÝPOČETNÉ**

DATE: 16-01-2017	MEASUREMENT: 1.20
	
TYPE/COAT: Lashier, s.r.l.	
IDENTIFICATION: Ing. L. F. F. F.	
SCALE: Ing. N. M. M. M.	
DATE: 16-01-2017	

